

# 高周波誘導加熱によるディーゼル排出微粒子低減の研究

著者	佐藤 健治
学位授与機関	東京商船大学
学位授与年度	2002
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00000682/">http://id.nii.ac.jp/1342/00000682/</a>

修士学位論文

高周波誘導加熱によるディーゼル排出微粒子低減の研究

平成 15 年度

(2003)

東京商船大学大学院  
商船学研究科  
商船システム工学専攻

佐藤 健治

## 目次

### 記号一覧

第1章 緒言	1
第2章 自動車用 DPF の現状	2
第3章 高周波誘導加熱を用いた排出微粒子低減システム	
3.1 誘導加熱の原理	5
3.2 船用機関における排出微粒子低減システム	
3.2.1 排出微粒子低減システムに誘導加熱を用いるメリット	6
3.2.2 排出微粒子低減システム	7
第4章 排出微粒子低減用フィルタの試作・実験	
4.1 円盤状セラミックフィルタ	
4.1.1 円盤状セラミックフィルタの構造	10
4.1.2 捕集実験	12
4.1.3 円盤状セラミックフィルタによる捕集実験結果	14
4.2 円筒状セラミックフィルタ	
4.2.1 円筒状セラミックフィルタの構造	16
4.2.2 円筒状セラミックフィルタによる捕集実験と加熱再生実験	19
4.3 円筒状金属フィルタ	
4.3.1 フィルタの目の粗さ選定	27
4.3.2 円筒状金属フィルタの構造	31
4.3.3 円筒状金属フィルタによる捕集実験と加熱再生実験	33
第5章 高周波誘導加熱電源	
5.1 ハードスイッチングとソフトスイッチング	
5.1.1 ハードスイッチング	34
5.1.2 ソフトスイッチング	36
5.2 複合共振 ZCS 高周波インバータ	
5.2.1 新しい複合共振回路	38
5.2.2 複合共振回路と直列共振回路	42
5.2.3 ソフトスタートとソフトスイッチング制御	49
5.3 回路設計	
5.3.1 回路パラメーターの選定	55
5.3.2 インピーダンス比 $p$ による影響	59
第6章 システムの耐久実験および考察	72
第7章 結言	87
謝辞	
参考文献	

## 記号一覧

Al : アルミニウム

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 酸化アルミニウム(アルミナ)

C<sub>ce</sub> : 静電容量

CO : 一酸化炭素

CO<sub>2</sub> : 二酸化炭素

Cr : クロム

DPF(Diesel Particulate Filter) : ディーゼル・パティキュレート・フィルタ

Ed : 入力電圧

EPA(U.S. Environmental Protection Agency) : 米国環境保護局

Fe : 鉄

f<sub>s</sub> : 動作周波数

f<sub>1</sub> : 1 次側共振周波数

f<sub>3</sub> : 3 次側共振周波数

HC : 炭化水素

HF·INV(High Frequency Inverter) : 高周波インバータ

H<sub>2</sub>O : 水

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) : 絶縁ゲート形バイポーラトランジスタ

IMO(International Maritime Organization) : 国際海事機関

I<sub>omax</sub> : 出力電流最大値

I<sub>orms</sub> : 出力電流実効値

I<sub>s</sub> : スイッチ電流

I<sub>smax</sub> : スイッチ電流最大値

I<sub>sug</sub> : サージ電流

L : インダクタンス成分

MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

: 金属酸化物半導体電界効果トランジスタ

n : 巻き数比(=N<sub>1</sub>/N<sub>2</sub>)

N<sub>1</sub> : 一次側コイルの巻き数

N<sub>2</sub> : 二次側コイルの巻き数

NO : 一酸化窒素

NO<sub>2</sub> : 二酸化窒素

NO<sub>x</sub> : 窒素酸化物

p : インピーダンス比(=3 次側インピーダンス/1 次側インピーダンス)

PM(Particulate Matter) : 粒子状物質

P<sub>o</sub> : 出力電力

SiC : 炭化珪素

SiO<sub>2</sub> : 二酸化ケイ素(酸化シリコン)

V<sub>g</sub> : ゲート電圧



$V_s$  : スイッチ電圧

$V_{smax}$  : スイッチ電圧最大値

$Y$  : イットリウム

ZCS(Zero Current Switching) : 零電流スイッチング

ZVS(Zero Voltage Switching) : 零電圧スイッチング

## 第1章 緒言

近年、国際的に環境保全に対する動きが活発となっている。日本においても陸上ディーゼルエンジンからの排気ガス中に含まれる  $\text{NO}_x$ (窒素酸化物)や  $\text{PM}$ (粒子状物質: Particulate Matter)による大気汚染や人体への影響が社会問題となっている。 $\text{NO}_x$  については、高濃度で呼吸器に悪い影響を与えるほか、酸性雨や光化学オキシダントの原因物質になるといわれている。 $\text{PM}$  については、大気中に長期間浮遊し、高濃度で肺や気管などに沈着して喘息など呼吸器に悪影響を与えるほか、発ガン性の恐れが指摘されている<sup>(1)</sup>。また、花粉症を誘発することが実験的に確認されている。今年の10月から全国に先立って東京都に加え埼玉県・千葉県・神奈川県でトラックやバスなど陸上ディーゼルエンジンからの排気ガスに対する規制が厳しくなる。このような背景からディーゼルエンジンからの排気ガス中に含まれる  $\text{NO}_x$  や  $\text{PM}$  の対策として各企業が酸化触媒やトラップ方式を用いた  $\text{DPF}$ (Diesel Particulate Filter)を開発しており、一部は既に実用化されている。しかし、この酸化触媒を用いた  $\text{DPF}$  においては、燃料中の硫黄分が多すぎると逆に  $\text{NO}_x$  や  $\text{PM}$  を増加させてしまう可能性がある。そこで燃料中の硫黄分を  $50\text{ppm}$  以下まで低減する必要がある。また、燃料のほかにエンジンオイルは未燃のオイルとして  $\text{PM}$  生成量に直接関与すると共に、後処理装置の劣化(オイル添加剤による被毒、目詰まりなど)にも影響を及ぼす可能性が高い<sup>(2)</sup>。このように  $\text{PM}$  の低減にはエンジン燃焼技術、後処理技術、さらには燃料性状の改良による  $\text{PM}$  生成量の低減手法など種々検討されている。

一方、船用ディーゼル機関については  $\text{IMO}$ (International Maritime Organization: 国際海事機関)において2000年1月1日以降に建造される船舶に搭載され、または同日以降に主要な改造が行われる出力  $130\text{kW}$  以上のディーゼルエンジンが  $\text{NO}_x$  の規制の対象となっている<sup>(3)</sup>。 $\text{PM}$  に関しては現在のところ規制の対象になっていない。しかし、地域的にみると米国では  $\text{EPA}$ (U.S. Environmental Protection Agency: 米国環境保護局)によって2004年から船用排ガス規制が適用される予定である。この船用排ガス規制は、 $37\text{kW}$  以上の船用エンジンを対象としており、 $\text{NO}_x, \text{HC}, \text{CO}, \text{PM}$  が規制の対象となっている。このように  $\text{PM}$  に関しても規制が始まり、いずれ  $\text{IMO}$  においても規制されることが予想できる。このような背景のもと、船用ディーゼル機関においても、燃料の改良・改質、燃焼方法の改善さらには後処理技術などが種々検討されている。しかし、船用ディーゼル機関における  $\text{PM}$  の後処理技術に関しては、 $\text{IMO}$  の規制がないために進んでいないのが現状である。そこで本論文では、排気ガス中の排出微粒子低減に焦点を絞り、後処理技術として高周波誘導加熱を用いた排出微粒子低減システムの適用を検討している。すなわち、セラミックや特殊合金などのさまざまな材質と円盤状あるいは円筒状など構造的な検討によるいくつかの排出微粒子低減用フィルタユニットを開発し、小型ディーゼル発電機を用いた排出微粒子捕集実験および加熱再生実験により、その効果を検討している。また、誘導加熱実験から排出微粒子低減フィルタとしての耐熱性および耐久性についても追究している。さらに船用ディーゼル機関からの排出微粒子低減用高周波誘導加熱電源として高出力化に適用可能な新しいコンセプトによる複合共振  $\text{ZCS}$  高周波インバータについてもシミュレーションと実験の両面から検討するとともにインバータのソフトスタートとソフトスイッチングを同時に行う制御回路についても述べている。

## 第2章 自動車用DPFの現状

環境への関心や危機意識が高まる昨今、環境汚染の要因となっている自動車排気ガスには厳しい目が向けられている。自動車の排出ガス規制は1966(昭和41)年9月のCO規制をはじめとして、順次規制の強化が図られてきた。NO<sub>x</sub>の規制は1974(昭和49)年から始まり、PMに関しては1994(平成6)年排出ガス規制(通称「短期規制」)から規制の対象となっている。特にトラックやバスなどのディーゼル車の排気ガスについては、環境汚染や人体への悪影響が懸念され大きな社会問題となっている。排気ガスによる環境への影響は、交通量の多い都市部に限定された問題ではなく、地球温暖化、酸性雨、オゾン層破壊など地球規模で考えられるべきものである。さらに石油資源枯渇に伴う代替エネルギーとも関連する重要なテーマとなっている。このようにディーゼルエンジンは排気ガスが汚く環境に悪いというイメージが定着しつつある。しかし、一方でエネルギー効率においては、ガソリンエンジンを上回っており、燃料消費率が小さく地球温暖化の原因とされるCO<sub>2</sub>(二酸化炭素)の排出量が少ないといった地球にやさしい一面も持っている。

ディーゼルエンジンの排気ガス中の有害な物質としてNO<sub>x</sub>やPM・黒煙がある。NO<sub>x</sub>は完全燃焼の高温下で発生しやすく、雨の中に溶け込みpH5.6以下の酸性雨の原因となる。さらに喘息などの呼吸器疾患との相関があり、光化学スモッグの原因ともなる。PM・黒煙は低温の不完全燃焼下で発生しやすく、視界を悪化させたり、建物や自動車、洗濯物に付着して汚れの原因になるなど生活環

境への影響が問題となっている。さらに近年、呼吸器に悪影響を与えることが分かってきており、喘息、花粉症などのほか、有機成分の中にはベンゾピレンやニトロピレンなどの発ガン性物質も含まれているため、肺がんや生殖異常など人体への健康影響が懸念されている<sup>(4)</sup>。このような背景のもと表2.1に示すように世界各国でディーゼル車からのNO<sub>x</sub>およびPMに関する規制が厳しくなっている。そこでこれらの有害物質を低減する技術として、エンジン本体および後処理技術の開発が進められている。例えばコモンレール式超高压燃料噴射システムといった噴射系の改良による燃焼の最適化技術、さらにDPFとして酸化触媒を用いた後処理システムによる排気ガスのクリーン化技術、またこれらのシステムをフィードバック制御や精密制御でコントロールする電子制御技術などがある。

表 2.1 世界の規制値

ヨーロッパ [g/kWh]	NO <sub>x</sub> 規制値	PM 規制値
2000 年	5.0	0.1
2005 年	3.5	0.02/0.03
2008 年	2.0	0.02/0.03
アメリカ [g/bhp-hr]	NO <sub>x</sub> 規制値	PM 規制値
2002 年	4.0	0.1
2004 年	2.5	0.05
2007 年	0.2	0.01
日本[g/kWh]	NO <sub>x</sub> 規制値	PM 規制値
2000 年	4.5	0.18
2003 年	3.38	0.05
2005 年	2.0	0.027

コモンレール式超高压燃料噴射システムとは、図 2.1 に示すように噴射ノズル手前に加圧タンク(コモンレール)を持つことで、超高压での燃料噴射を実現している。メインの高圧噴射は 1600 気圧の高圧で燃料を微粒子化して噴射し、燃料を最適化している。これにより燃焼効率を高め、PM・黒煙を低減する。また、ディーゼルエンジンは、空気を圧縮したときに燃料を噴射する。従来までは、燃料を 1 回噴射するだけであったが、電子制御によりパイロット噴射、メインの高圧噴射、1000 分の 1 秒単位で噴射時期、噴射量をきめ細かくコントロールすることにより、燃焼の最適化を図り NO<sub>x</sub> を低減するものである。

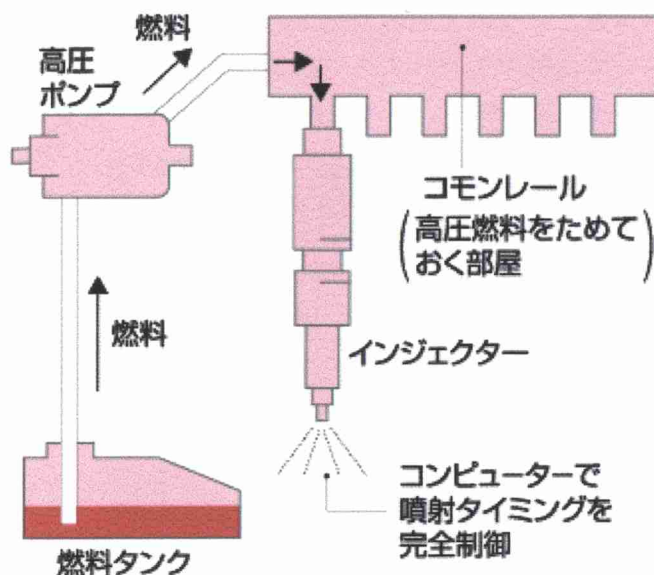


図 2.1 コモンレール噴射システム  
「日本経済新聞」ホームページより引用

DPF については、従来までフィルタで捕集した PM を電気ヒーターやバーナーなどで焼却する方式が主流であった。現在では、酸化触媒を利用した方式が主流となっている。

従来方式による PM 浄化の模式図を図 2.2 に示す。出口を封鎖された通路に入った PM を含むエンジンからの排出ガスは、フィルタ壁の微細な孔を通過して隣の通路に抜ける際に微粒子が捕集される。フィルタには微粒子が濾過できる耐熱性の高い材料として、セラミックまたは金属多孔体などが使用されている。炭化珪素(SiC)のフィルタの場合では孔径は 10 ミクロン程度である。これまでに路線バスや塵芥車で実証試験を行った DPF システムでは、複数のフィルタを交互あるいは順番に捕集・再生を行う間欠捕集・再生方式と 1 個のフィルタで捕集しながら再生を行う連続捕集・再生方式が用いられている。いずれの方式も、フィルタで捕集した PM 中の黒煙をヒーター等の熱源で 600℃以上にして燃焼させて再生する。間欠捕集・再生方式では一方のフィルタが PM で一杯になり目詰まりを起こす前に別のフィルタに切り替え、他方で捕集している間に電気ヒーターによって 600℃以上の温度で PM を燃焼させる。

現在は酸化触媒の化学反応を利用した低温で連続再生させる DPF システムが実用化されつつある。このシステムはシンプルで小型化できるため、使用過程車のマフラーと

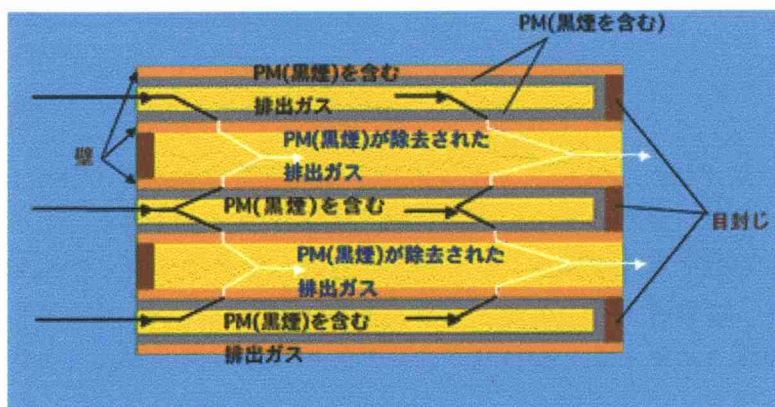


図 2.2 従来方式の DPF  
「財団法人 日本自動車研究所」ホームページより引用

交換する場合でもそのままの位置に装着でき、電気系統あるいは燃料系統の DPF に付随した工事が不要である。さらにコスト全体が安価になる可能性があるといったメリットを持っている。その多くの特徴から将来的には DPF の大半が酸化触媒を利用した連続再生方式になると考えられている。図 2.3 に酸化触媒を用いた連続再生方式の代表的なシステムを示す。酸化触媒と目封じをしたフィルタが直列に配置されている。NO<sub>x</sub> や PM 等の反応過程を図 2.4 に示す。酸化触媒で排気ガス中の HC(炭化水素)と CO(一酸化炭素)を CO<sub>2</sub>(二酸化炭素)と H<sub>2</sub>O(水)に変化させる。また、NO(一酸化窒素)を NO<sub>2</sub>(二酸化窒素)にして二酸化窒素の比率を一時的に高める。ここで生成された NO<sub>2</sub> でフィルタに捕集された PM 中のスス(C)成分を低温で燃焼除去する。ただし、このシステムでは燃料中の硫黄分濃度が 50ppm 以下の低硫黄であることが必須の条件となっている。

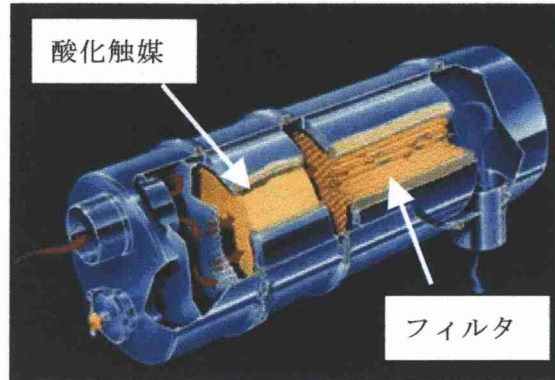


図 2.3 酸化触媒を用いた連続再生  
「財団法人 日本自動車研究所」  
ホームページより引用

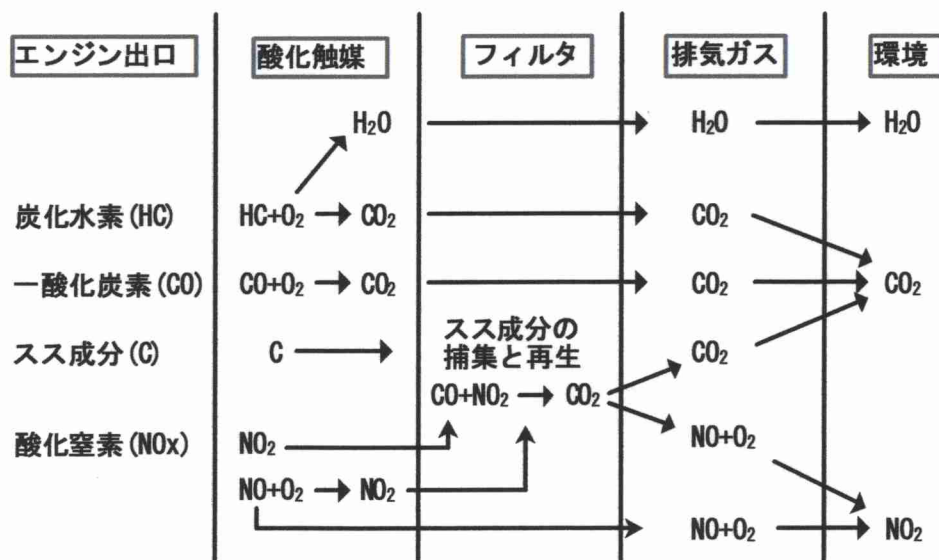


図 2.4 酸化触媒を使用した DPF の原理

このようにさまざまな NO<sub>x</sub> や PM の低減技術が開発されている。しかし、近年 PM に関してナノ粒子の存在が明らかとなった。ナノ粒子とは、排気ガスに含まれる粒子状物質の中でも特に小さい直径 50nm 以下のものをさす。このナノ粒子は、小さくて鼻毛はもちろん肺の細胞まですり抜けて血管に入り込み、アレルギー反応など健康に悪影響をおよぼすことが懸念されている。このナノ粒子に関しては研究が始まったばかりで、新たな課題の一つとなっている。



### 第3章 高周波誘導加熱を用いた排出微粒子低減システム

#### 3.1 誘導加熱の原理

誘導加熱の原理は、図 3.1 に示すように高周波インバーターからワーキングコイルに高周波交流を供給する。ワーキングコイルの周辺には交番磁束が発生し、「ファラデーの電磁誘導の法則」にしたがって交番磁束の変化を妨げる方向に誘導起電力が生じる。この誘導起電力によって被加熱物の内部には渦電流が発生する。この結果、フィルタ内部に生じた渦電流とフィルタの固有抵抗とで表されるジュール熱によって、フィルタが直接加熱される原理となっている。排出微粒子低減ユニットの概略は図 3.1 に示すように排気管内に被加熱物である捕集フィルタを充填する。そして、捕集フィルタを完全に覆うようにワーキングコイルを排気管の外側にソレノイド状に巻きつけた構造となっている。

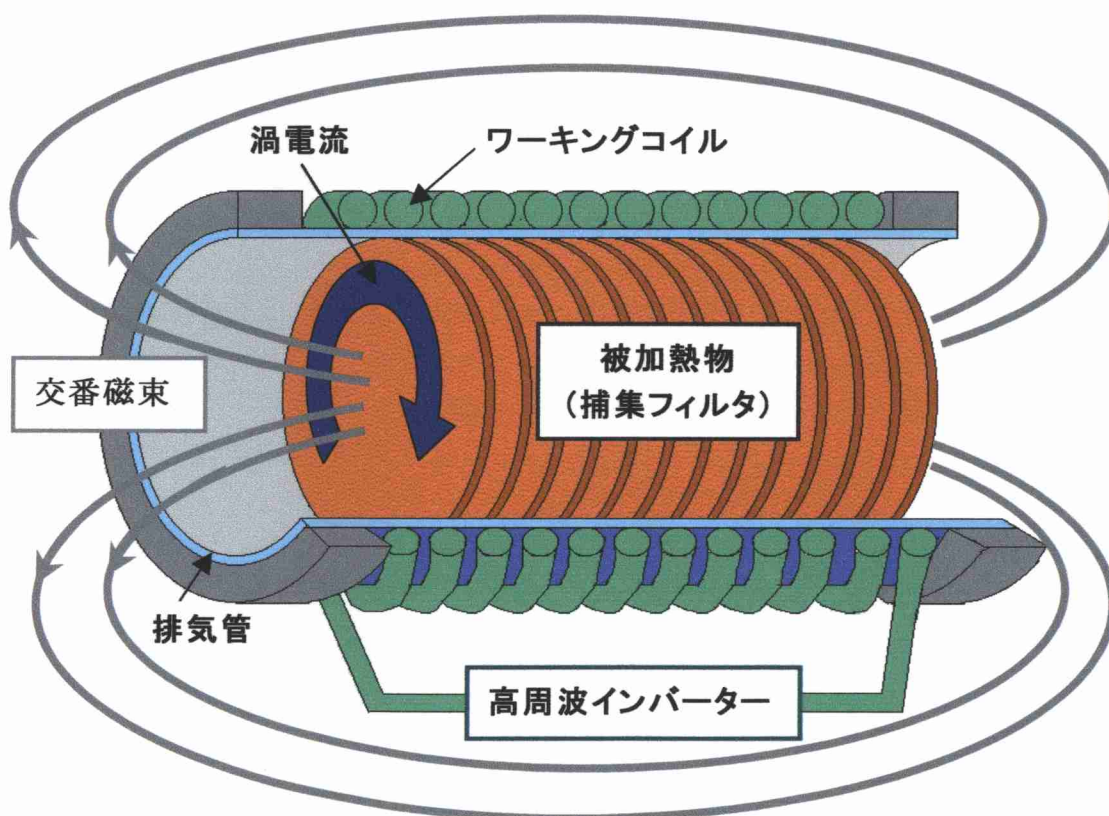


図 3.1 誘導加熱の原理

### 3.2 船用機関における排出微粒子低減システム

#### 3.2.1 排出微粒子低減システムに誘導加熱を用いるメリット

船用機関における排出微粒子低減システムとして、ニクロム線ヒーターやバーナーではなく誘導加熱を用いるメリットとして以下のことが挙げられる。

① ワーキングコイルと被加熱物が非接触の状態で加熱できる。

ニクロム線ヒーターを使用したときのように導線を配管内に入れる必要がなく、ワーキングコイルは配管の外側に巻きつけるだけで良い。そのためニクロム線ヒーターを使用したときのようなニクロム線に排出微粒子が付着し、燃焼することによるニクロム線の焼損や断線といった問題が発生しない。したがってメンテナンスが比較的容易で構造が簡単である。

② 加熱物を直接加熱することができる。

ニクロム線ヒーターの場合ではニクロム線ヒーターからの伝熱によって間接的にフィルタが加熱される。したがって、伝熱する際に損失が発生し、効率が悪化してしまう。それに対して、誘導加熱ではフィルタが直接加熱されるため投入した電力がフィルタの加熱にのみ使用され効率が良い。

③ エネルギー密度が高く、急速加熱が可能である。

排出微粒子低減システムにおいて排出微粒子を早く燃焼させることにより、システムにおける排出微粒子の燃焼除去行程に要する時間を短くすることができる。排気ガス流量の多い船舶においては、排出微粒子の燃焼除去に要する時間を短くすることでフィルタの個数を減らすことができ排出微粒子低減ユニットの小型化にも繋がるため、有効な再生方式だと考えられる。

④ 加熱する際の温度制御性能に優れている。

加熱する際の温度制御性能がバーナーなどを用いた再生方式と比べて優れており、フィルタを設定した温度に加熱することができる。したがって、フィルタの過熱による焼損などの問題が起こりにくい。

⑤ 安全でクリーンなシステムである。

バーナーによる再生方式と比べて炎が出ないため、安全でクリーンなシステムである。

### 3.2.2 排出微粒子低減システム

図 3.2,3.3 に従来の排出微粒子低減システムと本論文で提案する排出微粒子低減システムの概略図を示す。図 3.2 に示す従来の排出微粒子低減システムは、機関運転前に排気管内に設置した金属フィルタを高周波誘導加熱によって高温に加熱した状態にしておく。そして、機関を運転して排気ガスをフィルタに通す。これにより排気ガス中の排出微粒子は、フィルタを通過する際にフィルタに接触して加熱され、燃焼除去されるシステムとなっている。

一方、本論文で提案する排出微粒子低減システムは、図 3.3 に示すように誘導加熱ユニットを複数設置してある。これにより排気ガス中の排出微粒子の捕集行程と燃焼除去行程を独立させた。すなわち、船用ディーゼル機関からの排気ガスを一旦フィルタに通す。そして排気ガス中の排出微粒子をフィルタで捕集する。その後、捕集しているフィルタの入口と出口の圧力差がある設定値に達したところで、排気ガスの流路を切り替えて別のフィルタで排出微粒子を捕集する。この間に排出微粒子を捕集して目詰まりを起こしたフィルタを排気ガスが通っていない状態で加熱再生するシステムとなっている。また、本論文で提案する排出微粒子低減システムに改善したことによるメリットを以下に示す。

#### ① 排出微粒子の燃焼除去に必要な電力量を抑制することができる。

従来のシステムでは、排気ガス中の排出微粒子を燃焼除去するのに必要な電力が莫大なものとなっていた。なぜなら、加熱されたフィルタから伝わる熱は、排出微粒子を含む排気ガス全体に伝わってしまうからである。すなわち、加熱したフィルタを大きなファンで冷却している状態で排出微粒子を燃焼除去するような方式であった。それに対して本論文で提案するシステムでは、排出微粒子の捕集と燃焼除去を独立な行程とした。これにより排気ガスが通っていない状態で排出微粒子を加熱し、燃焼除去するためフィルタの熱を排出微粒子の燃焼にのみ使うことができ、投入電力量を抑えることができる。

#### ② フィルタの寿命を延ばすことができ、メンテナンスも容易である。

従来のシステムでは、常にフィルタは加熱されている状態にあるためフィルタの寿命が短くなってしまう。また、フィルタに何らかの問題が生じた場合、点検するためには主機関を止めて行う必要がある。それに対して、本論文で提案するシステムでは、複数のフィルタが順番に加熱されるためフィルタの寿命を延ばすことができる。さらにフィルタに何らかの問題が生じた場合は、排気ガスの流路を切り替えることにより主機関を停止することなくフィルタの点検を行うことができる。



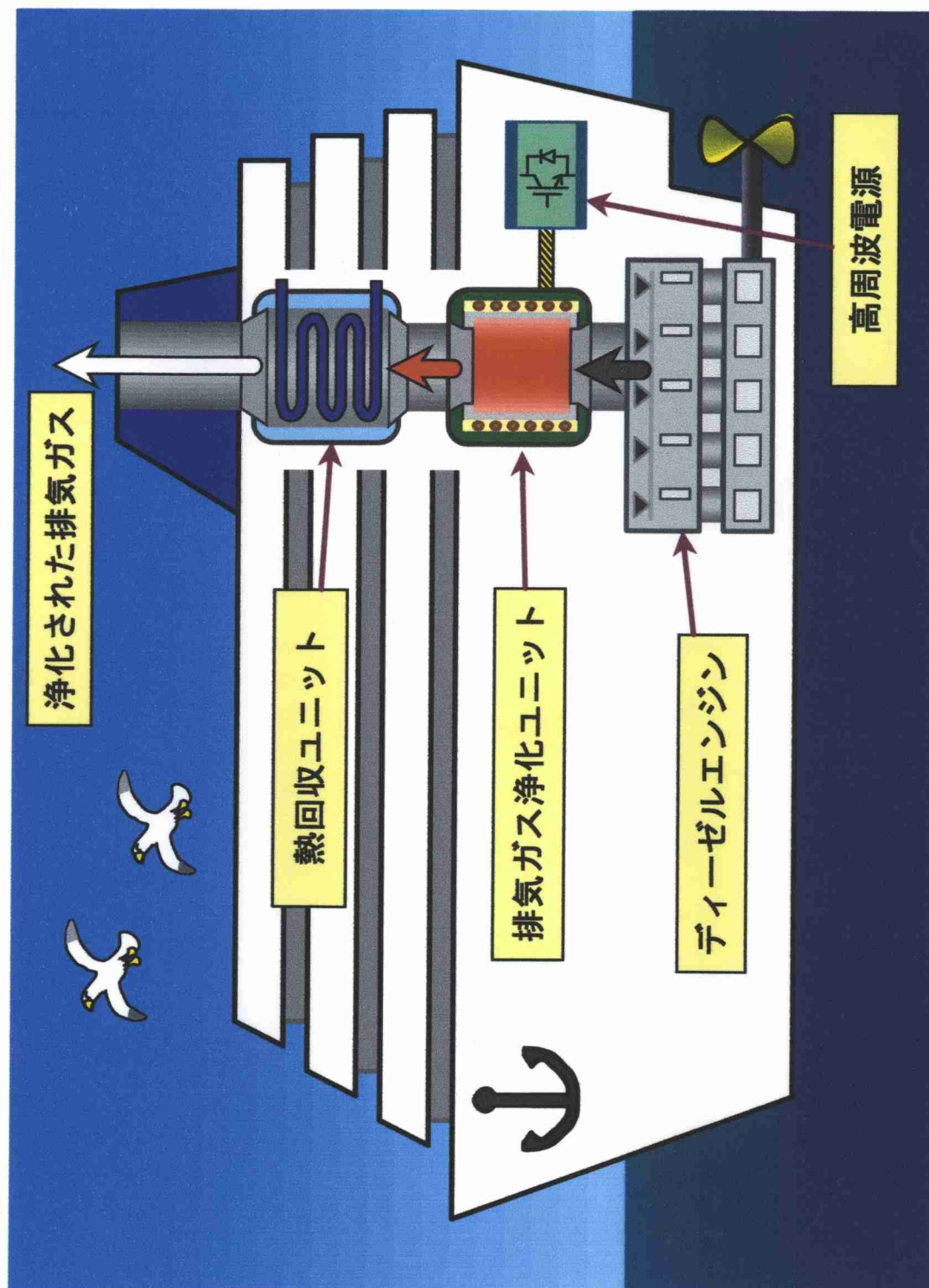


図 3.2 従来の排出微粒子低減システム

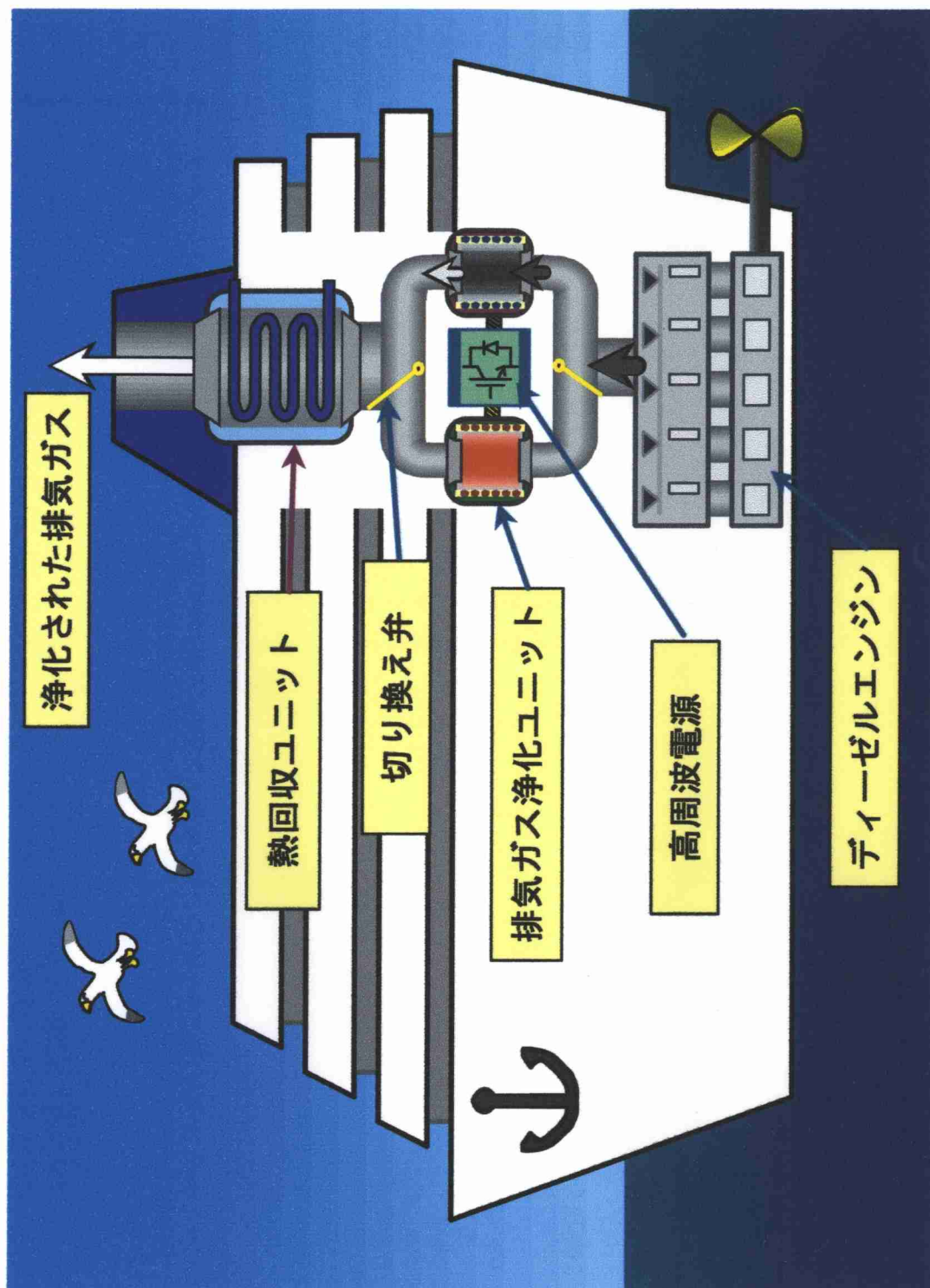


図 3.3 提案する排出微粒子低減システム

## 第4章 排出微粒子低減用フィルタの試作・実験

### 4.1 円盤状セラミックフィルタ

#### 4.1.1 円盤状セラミックフィルタの構造

円盤状セラミックフィルタは、図 4.1 に示すように直径 98mm、厚さ 1mm の SUS430(磁性体)からなるパンチングメタルによって排出微粒子捕集用セラミックフィルタを挟んだ形状となっている。排気ガスはパンチングメタルの面に対して垂直に流れる。また、パンチングメタルの穴の形状は、 $3\phi \times 5P$ (穴の径 3mm でピッチが 5mm)となっており穴の占有率は約 33%のものである。今回使用した捕集用セラミックフィルタは、チラノチョップ状繊維とセラミックファイバーである。チラノチョップ状繊維は、その繊維の形状から表 4.1 に示すように 2 種類に分けることができる。また、セラミックファイバーの仕様は表 4.2 に示すとおりである。なお、それぞれの外観は、図 4.2, 4.3 に示すようになっている。

今回、この 3 種類のセラミックフィルタの組み合わせとして次の 4 通りのフィルタについて捕集実験を行った。

- ① チラノチョップ状繊維 A タイプ(以後、A タイプという。)
- ② チラノチョップ状繊維 B タイプ(以後、B タイプという。)
- ③ B タイプ+A タイプ
- ④ B タイプ+セラミックファイバー+A タイプ

ここで③,④におけるセラミックフィルタの表示順序は、排気ガスの流れに対して上流側から順番に表示した。すなわち、③では排気ガスの上流側から B タイプ、そして下流側に A タイプを設置したことを意味している。

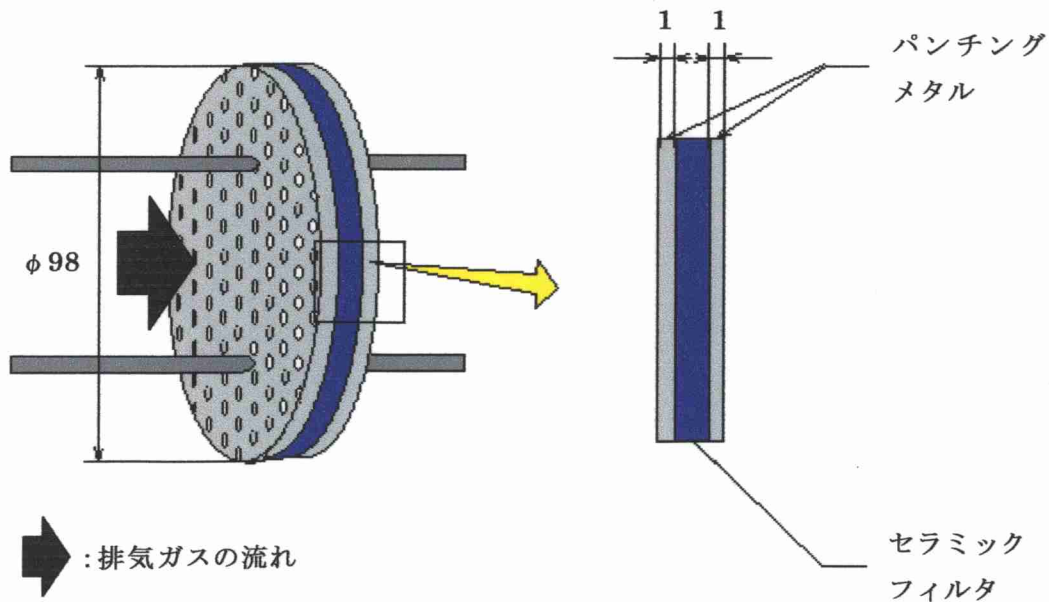


図 4.1 円盤状セラミックフィルタの構造



表 4.1 チラノチョップ状繊維の仕様

特性	A タイプ	B タイプ
使用繊維	チラノチョップ状繊維	チラノチョップ状繊維
フィラメント径[ $\mu\text{m}$ ]	9	14
引張強力[N/50mm]	0.6 以上(170g/m <sup>2</sup> )	0.6 以上(250g/m <sup>2</sup> )
厚さ[mm]	1.5(170g/m <sup>2</sup> )	2.2(250g/m <sup>2</sup> )



全体図



拡大図

図 4.2 チラノチョップ状繊維の外観

表 4.2 セラミックファイバーの仕様

最高使用温度[°C]	1260
嵩密度[kg/m <sup>3</sup> ]	130
厚さ[mm]	4
化学成分[%]	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	48
SiO <sub>2</sub>	52



図 4.3 セラミックファイバーの外観

#### 4.1.2 捕集実験

捕集実験の概要を図 4.4 に示す。捕集実験は、小型ディーゼル発電機からの排気ガスをフィルタが設置されたフランジに導き、フィルタを通過した後のフランジ出口の排気ガスをディーゼルスモークメータにて採取する。なお、フランジ出口付近での大気との混合を防ぐため長さ 20cm の筒をフランジ出口に設置して、その筒の中で排気ガスを採取する。この筒で採取した排気ガスの黒煙濃度を比較してフィルタの捕集能力を検討する。捕集実験の流れは、図 4.5 のタイムチャートに示すようにエンジンを始動して 3 秒後の排気ガスをスモークメータで採取し、エンジンを始動してから 5 秒後にエンジンを停止する。そして、再びエンジンを始動して排出微粒子を捕集する。この操作を繰り返し行って各フィルタの捕集能力を比較する。ここで捕集期間を 5 秒としたのは、今回使用したディーゼルエンジンは、始動後約 5 秒間のみ黒煙を排出する。そして始動後 5 秒以上経つとほぼ無色の排気ガスとなる。そのためエンジンを始動してから黒煙が排出されている 5 秒間を排出微粒子の捕集期間とした。また、スモークメータでの排気ガスの採取時期を黒煙が排出されている始動後 3 秒のポイントとする。これによりフィルタが設置されていない時および他のフィルタとの黒煙濃度低減能力を比較することができる。この黒煙濃度低減能力を比較するため、図 4.6 に示す簡易的なディーゼルスモークメータを使用した。このディーゼルスモークメータは、運輸省(現在の国土交通省)によって認定されたバス・トラック向けのスモークメータである。このスモークメータによる排気ガスの黒煙濃度測定方法は、排気ガスをサンプリングしてろ紙で受ける。そして、そのろ紙の汚染度をろ紙からの反射光を光電素子に受け、その反射光量を電流に変換して指示計で表示するろ紙反射式スモークメータである。ろ紙の汚染度は、図 4.7 に示す校正用標準色紙の 50.5% を基準として表示される。なお、本捕集実験は船用機関からの排出微粒子低減システムの基礎実験として行っているため、表 4.3 に示す仕様の小型ディーゼル発電機を使用した。ただし、使用燃料は、軽油のところ A 重油を使用して船用機関を模擬している。



図 4.4 捕集実験の概要

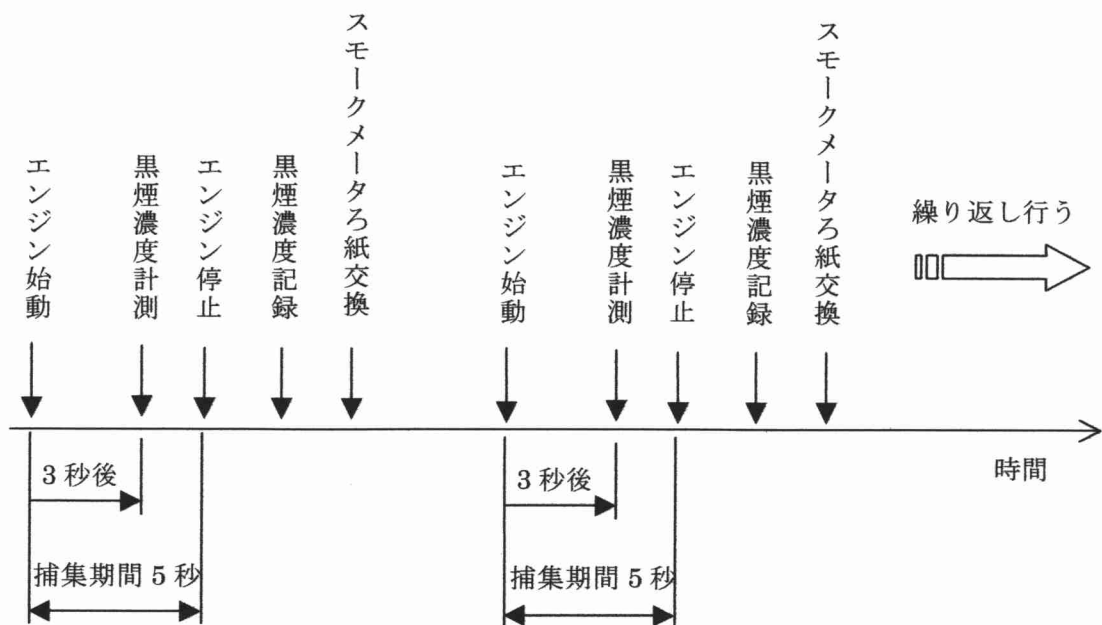


図 4.5 捕集実験のタイムチャート

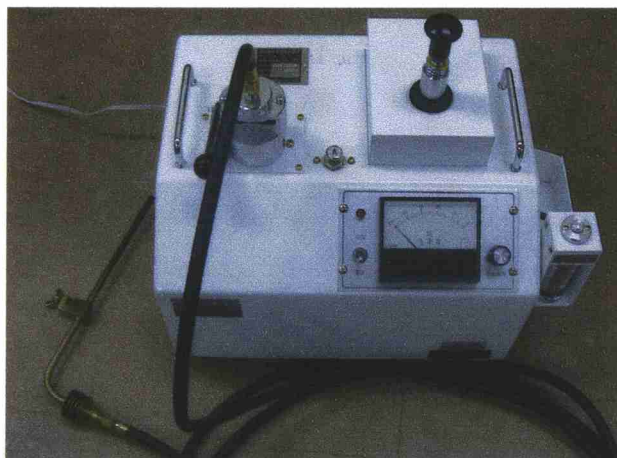


図 4.6 スモークメータ

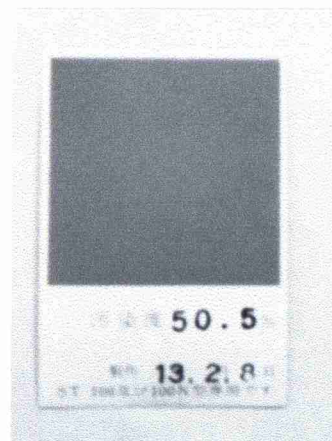


図 4.7 校正用標準色紙(50.5%)

表 4.3 小型ディーゼル発電機の仕様

小型ディーゼル発電機の仕様 (エンジンについて)			
名 称	L48ADGY5		
形 式	立形空冷 4 サイクルディーゼル機関		
燃 焼 方 式	直接噴射式		
シリンダ径×行程	φ 70×55[mm]	連続定格出力	2.8/3000[kW/rpm]
総 行 程 容 積	0.211[l]	最大出力	3.1/3000[kW/rpm]
使 用 燃 料	軽油のところ A 重油		

#### 4.1.3 円盤状セラミックフィルタによる捕集実験結果

4.1.2 節で述べた捕集実験概要に従って、小型ディーゼル発電機からの排気ガスをフィルタを設置せずに直接採取したときの黒煙濃度と以下に示す4通りのセラミックフィルタを使用したときの捕集実験結果を表 4.4 に示す。また、そのときのろ紙の汚染状態を図 4.8～4.11 に示す。

- ① B タイプ
- ② A タイプ
- ③ B タイプ +A タイプ
- ④ B タイプ+セラミックファイバー+A タイプ

捕集実験の結果、フィルタを設置せずにディーゼルエンジンからの排気ガスを直接採取した場合は、黒煙濃度が約 84%であった。それに対して A タイプおよび B タイプを組み合わせた場合は、いずれも約 24～28%と大きな差はなかった。そこで A タイプ、B タイプより目の細かいセラミックファイバーを追加し、更なる黒煙濃度の低減を図った。しかし、セラミックファイバーを追加することによりフィルタに過大な背圧がかかってしまいフィルタ通過後の排気ガス黒煙濃度を測定することができなかった。これは、セラミックファイバーを追加したことによりフィルタの空隙率が極端に低下したためと考えられる。そこでフィルタによる背圧を抑制し、かつ誘導加熱が可能な構造として円筒状セラミックフィルタについて次節で検討する。

表 4.4 円盤状フィルタにおける捕集実験結果

		1 回目	2 回目	3 回目
スモークメータ 黒煙濃度	フィルタなし	84%	84%	83%
	B タイプ	25%	27%	28%
	A タイプ	26%	26%	28%
	A タイプ+B タイプ	26%	26%	24%
	A タイプ+B タイプ+ セラミックファイバー	—	—	—



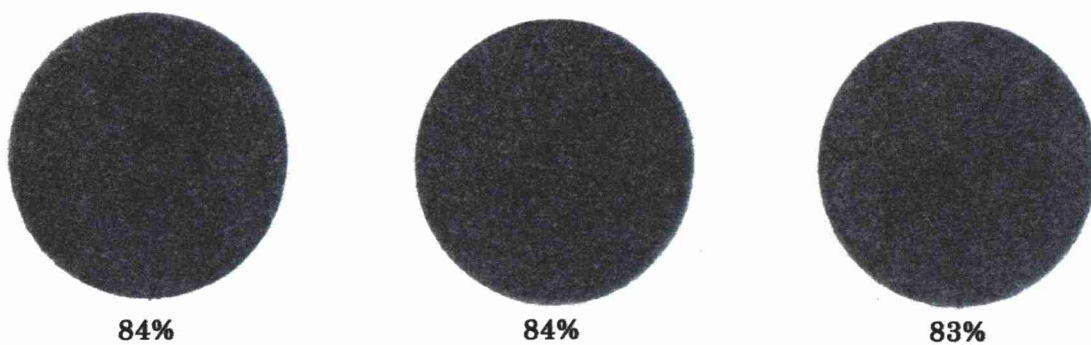


図 4.8 フィルタなしの時の黒煙濃度

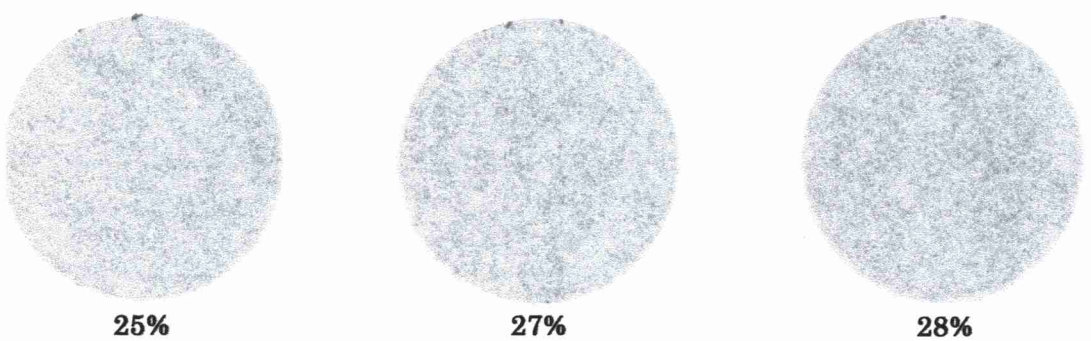


図 4.9 Bタイプ使用時の黒煙濃度

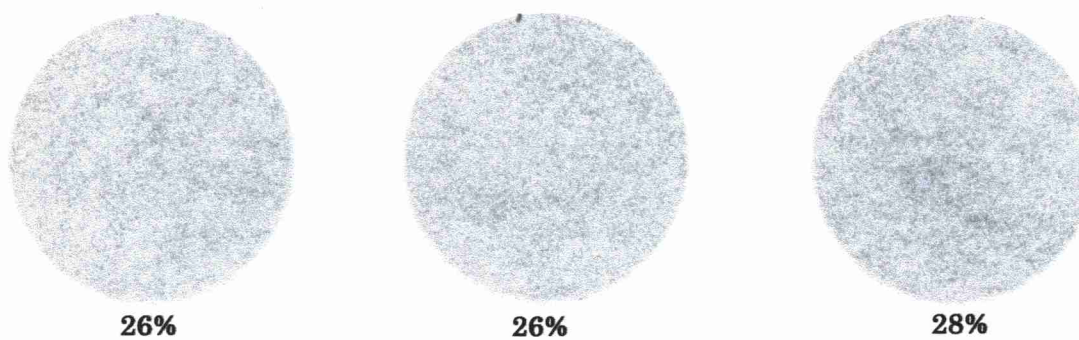


図 4.10 Aタイプ使用時の黒煙濃度

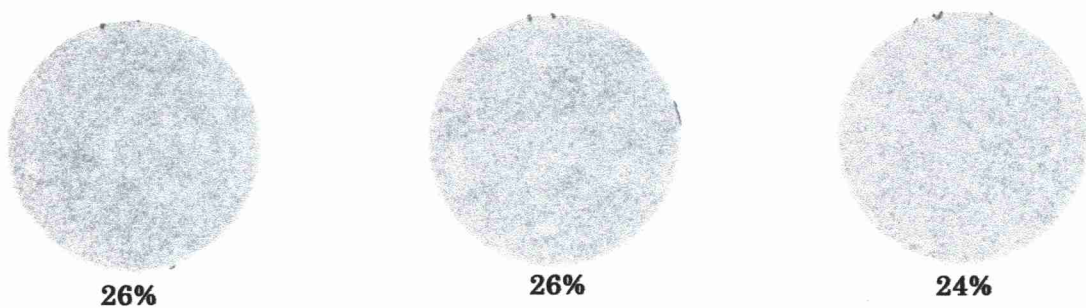


図 4.11 BタイプとAタイプ使用時の黒煙濃度



## 4.2 円筒状セラミックフィルタ

### 4.2.1 円筒状セラミックフィルタの構造

4.1 節の円盤状セラミックフィルタの改良型として円筒状セラミックフィルタについて検討する。この円筒状セラミックフィルタの構造は、図 4.12 に示すように中心から SUS430 の円筒状パンチングメタル(円筒 C)、そして A タイプセラミックファイバー-B タイプからなる 3 層セラミックフィルタ、SUS430 の円筒状パンチングメタル(円筒 B)、SUS316 の円筒状平板(円筒 A)からなっている。また、排気ガスは円筒 A および円筒 B の間から入り、3 層セラミックフィルタを通過して円筒 C の内側から排出される。この円筒状構造において排出微粒子を捕集した 3 層セラミックフィルタを加熱再生するには円筒 B および円筒 C からの伝熱によってセラミックフィルタを排出微粒子が燃焼する温度まで加熱する必要がある。したがって、円筒 B および円筒 C には、材質として磁性体である SUS430 を使用している。そして、配管の内面に配置した円筒 A には、円筒 B および円筒 C の加熱を妨げないように非磁性体である SUS316 を使用している。ここに円筒 A を配置した理由は、誘導加熱によって加熱された円筒 B、C の熱が大気に放出するのを防止する断熱材の役割を持たせるためである。

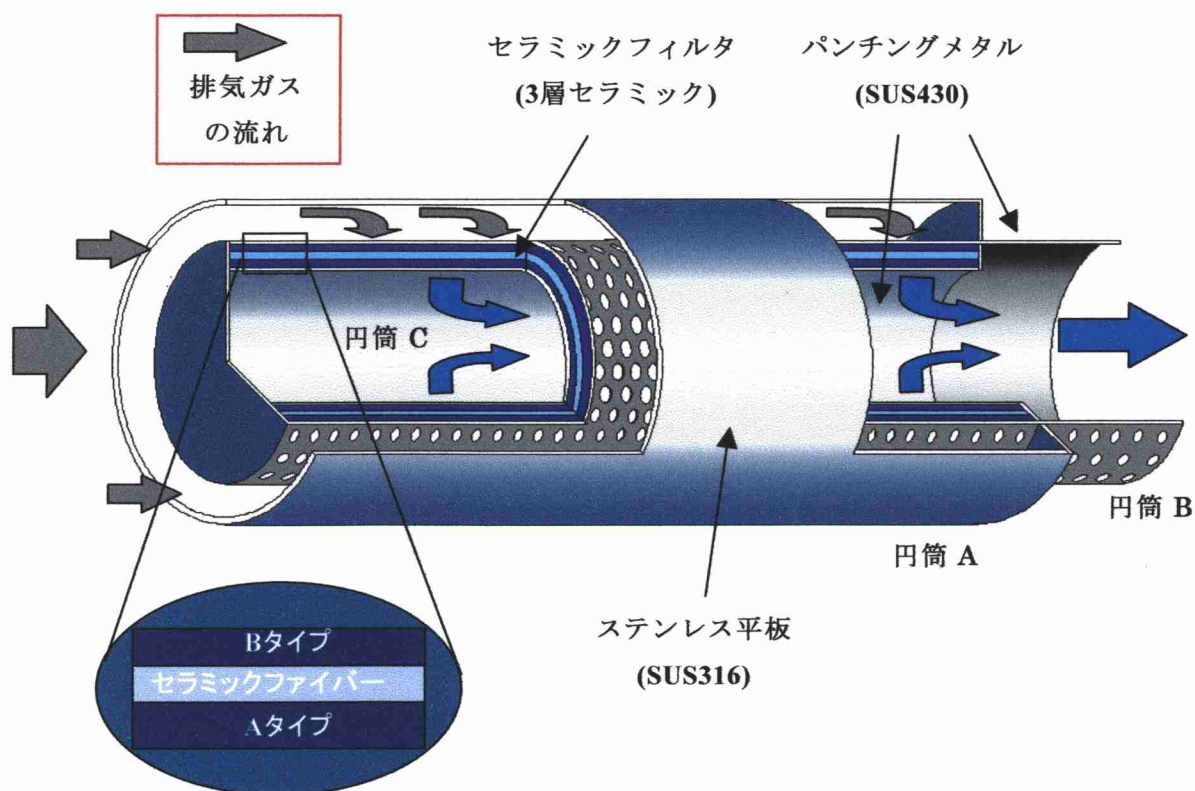


図 4.12 円筒状セラミックフィルタ

前述の円盤状セラミックフィルタにおいて、フィルタでの背圧が大きな問題となった。そこでフィルタの形状を円盤状から円筒状にすることにより捕集面積を拡張する。さらにパンチングメタルを  $3\phi \times 5P$  (穴の径×ピッチ) から  $3\phi \times 4P$  に変更することによりパンチングメタルの穴の占有率を約 33% から約 51% に拡大した。これにより図 4.13 に示すように排出微粒子の捕集面積を約  $25\text{cm}^2$  から約  $332\text{cm}^2$  まで約 13.3 倍に拡張した。これによりフィルタにかかる背圧の抑制をねらう。

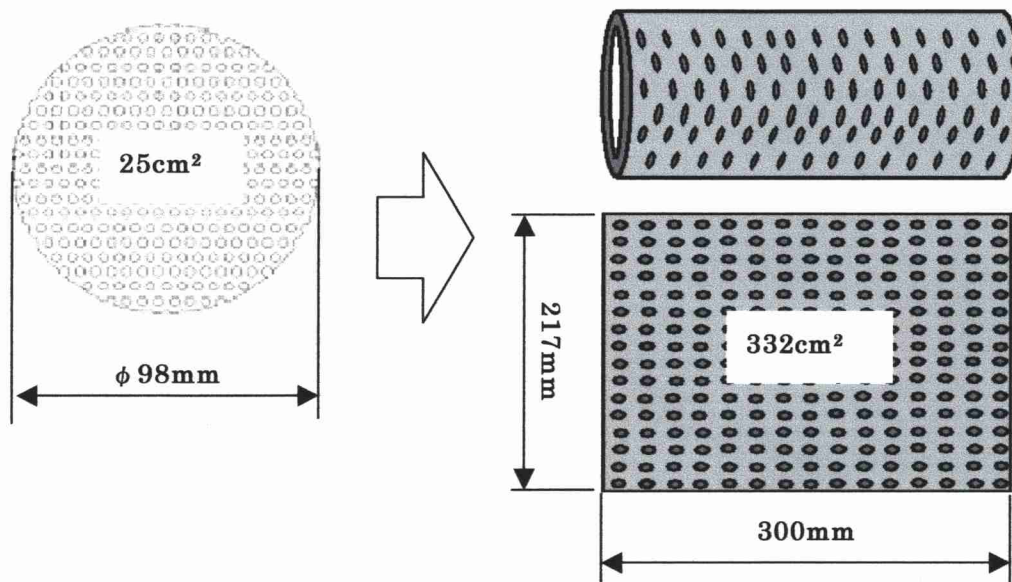


図 4.13 捕集面積の比較

また、円筒状フィルタにおいて排気ガスの流れを図 4.12 に示すように外周から中心部へとすることによりフィルタの外周部で排出微粒子を捕集する。これにより誘導加熱時の表皮効果を利用して、排出微粒子を捕集したフィルタの外周部が加熱されやすくなる。したがって誘導加熱の特徴を利用した構造となっている。

捕集部のセラミックフィルタを排気ガスの上流から“B タイプ—セラミックファイバー—A タイプ”とした目的は、図 4.14 に示すように排出微粒子を粒子径別に捕集するためである。このように排出微粒子を粒子径別に捕集することによりフィルタが目詰まりを起こすまでの時間を稼ぐことができる。これは各セラミックフィルタ層で粒子径別に排出微粒子を捕集するため、すべての粒子径を一層のフィルタで捕集する単層フィルタ(図 4.15 参照)と比べて目詰まりを起こしにくくなるからである。さらに背圧の抑制効果もある。ここで排気ガスの流れの下流側に A タイプを配置した目的は、セラミックファイバーの保護のためである。フィルタの再生方式は、円筒 B,C からの伝熱でセラミックフィルタを再生するため円筒 B,C の温度は排出微粒子の燃焼温度よりも高温となる。そのため高温状態においてあまり耐久性のないセラミックファイバーを高温状態でも耐久性のあるチラノチョップ状繊維で挟むことによりセラミックファイバーの劣化を抑制している。

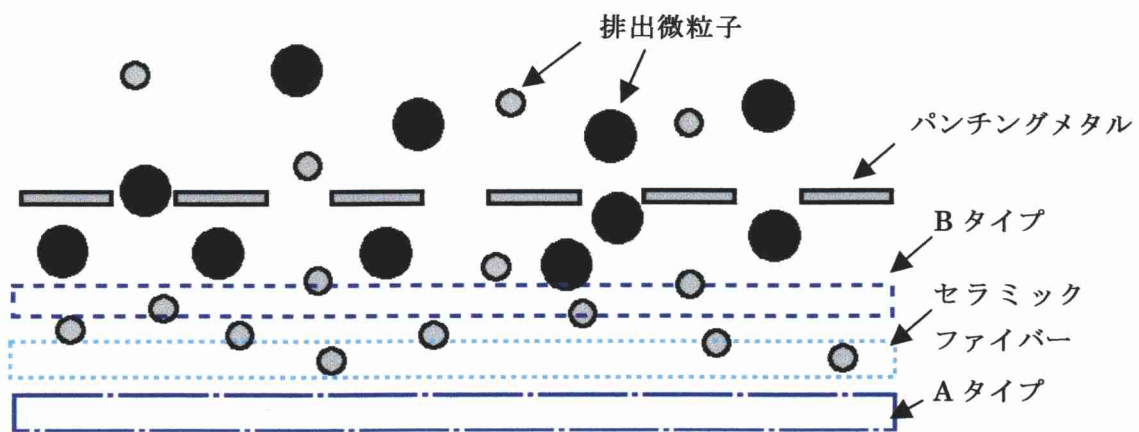


図 4.14 3層セラミックフィルタによる捕集

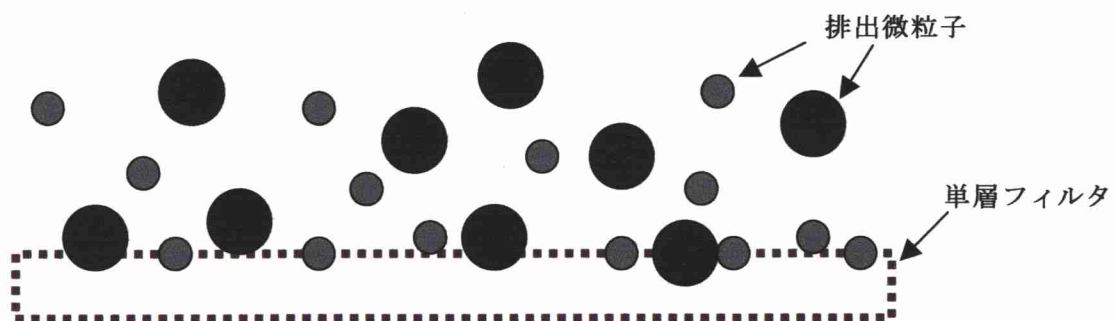


図 4.15 単層フィルタによる捕集

#### 4.2.2 円筒状セラミックフィルタによる捕集実験と加熱再生実験

前述の円筒状セラミックフィルタを用いた捕集実験および加熱再生実験よりフィルタの排出微粒子捕集能力および加熱・冷却に対する耐熱性を検討する。実験の流れは、図 4.16 のタイムチャートに示すように、4.1.2 節で述べた方法による捕集実験を行う。その後、誘導加熱によるフィルタの加熱再生実験により捕集した排出微粒子を燃焼除去する。一般に PM は約 600℃から燃焼が進むとされている<sup>(5)</sup>。したがって本加熱再生実験では、図 4.17 に示すようにフィルタの 4 箇所の温度を熱電対温度計で測定して温度が 600℃に達してから、10 分間加熱することとする。図 4.18 に排出微粒子を捕集したセラミックファイバーと 600℃,10 分間の加熱によって排出微粒子を燃焼除去したセラミックファイバーを示す。この図から明らかなように加熱前のセラミックファイバーは、排出微粒子を捕集して真っ黒になっている。それに比べて加熱後のセラミックファイバーは、排出微粒子が燃焼除去されたため元の白色に戻っていることが確認できる。なお、加熱後のセラミックファイバーで排出微粒子が黒く残っている部分があるが、これは使用したフランジとフィルタの構造上ワーキングコイルを十分に巻くことができなかった部分である。そのためフィルタが十分に加熱されず排出微粒子が燃焼する温度まで達しなかったためだと考えられる。

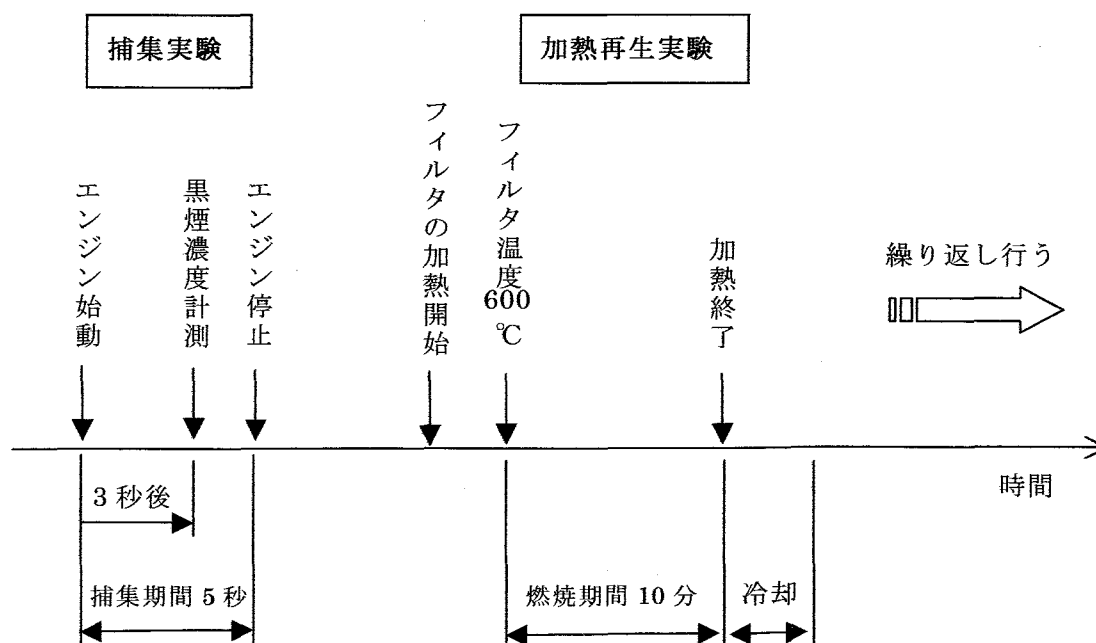


図 4.16 捕集実験と加熱再生実験の流れ



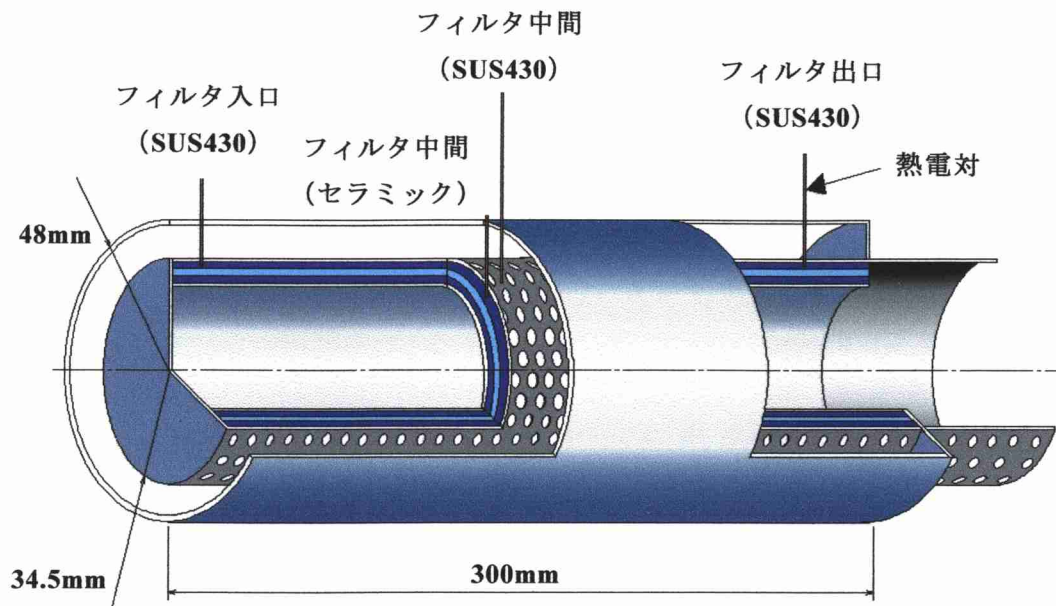
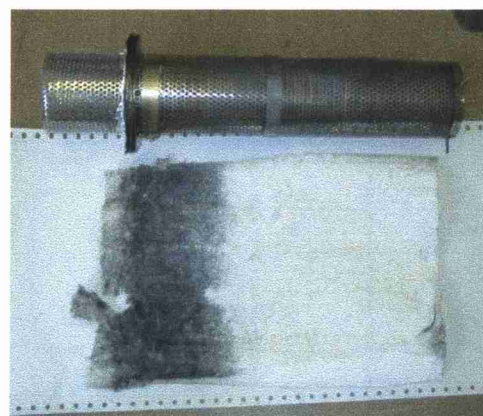


図 4.17 温度計測ポイント



捕集後のセラミックファイバー



加熱再生後のセラミックファイバー

図 4.18 捕集後と加熱再生後のセラミックファイバーの比較

次に捕集実験と加熱再生実験を繰り返し行い円筒状セラミックフィルタの耐久実験を行った。この耐久実験の結果を表 4.5 に示し、このときのろ紙の汚染状態を図 4.19～4.28 に示す。表 4.5 中の「フィルタの状態」とは、捕集部のセラミックフィルタがどういう状態のものを使用したかを表し、「誘導加熱前」は、新品のセラミックフィルタを使用したことを表す。そして、「1 回目誘導加熱処理後」は、新品のセラミックフィルタを使用して捕集実験を行った後、フィルタを誘導加熱により再生し、このセラミックフィルタを使用して再び捕集実験を行ったときの結果を表している。したがって、「2 回目誘導加熱処理後」は、フィルタの加熱再生を 2 度行ったあとのセラミックフィルタを使用して捕集実験を行った際の結果を表している。また、排出微粒子低減率とは、次頁に示す式で定義している。すなわち、フィルタを設置していない状態での黒煙濃度を 100%に換算し、フィルタを設置しない時の黒煙濃度をフィルタによってどの程度低減したかを表すものである。

$$\text{排出微粒子低減率}[\%] = \left( 1 - \frac{\text{フィルタを設置したときの平均黒煙濃度}}{\text{フィルタを設置しないときの黒煙濃度}} \right) \times 100$$

この実験結果より 5 回目誘導加熱処理後から黒煙濃度が上昇している。この原因として排出微粒子の捕集実験において排気圧力を受けたこととフィルタの加熱再生実験による加熱・冷却を繰り返し行ったことによりセラミックフィルタが損傷または劣化したものと考えられる。

また、セラミックフィルタを円筒 B および円筒 C からの伝熱で加熱するためセラミックフィルタの温度が 600℃に達するまで約 30 分必要となる。つまり、フィルタの加熱を開始してからフィルタの再生が終了するまで約 40 分かかり、加熱に要した電力量は 1.46kWh になる。このようにフィルタの再生に約 40 分要すると“排出微粒子の捕集”と“燃焼除去”からなる排出微粒子低減システムのサイクルが成立しなくなる。そこで次節において短時間での再生を狙った円筒状金属フィルタについて検討する。

表 4.5 円筒状セラミックフィルタによる捕集実験結果

	フィルタの状態	ディーゼルエンジン始動回数					平均値	排出微粒子低減率
		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目		
スモークメータ汚染率	誘導加熱前	1%	0%	0%	0%	0%	0.2%	99.8%
	1 回目誘導加熱処理後	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
	2 回目誘導加熱処理後	2%	0%	0%	0%	0%	0.4%	99.5%
	3 回目誘導加熱処理後	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
	4 回目誘導加熱処理後	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
	5 回目誘導加熱処理後	4%	4%	2%	3%	3%	3.2%	96.2%
	6 回目誘導加熱処理後	4%	3%	3%	3%	3%	3.2%	96.2%
	7 回目誘導加熱処理後	6%	5%	4%	4%	2%	4.2%	95.0%
	8 回目誘導加熱処理後	6%	4%	4%	3%	5%	4.4%	94.7%
	9 回目誘導加熱処理後	6%	3%	2%	2%	1%	2.8%	96.7%

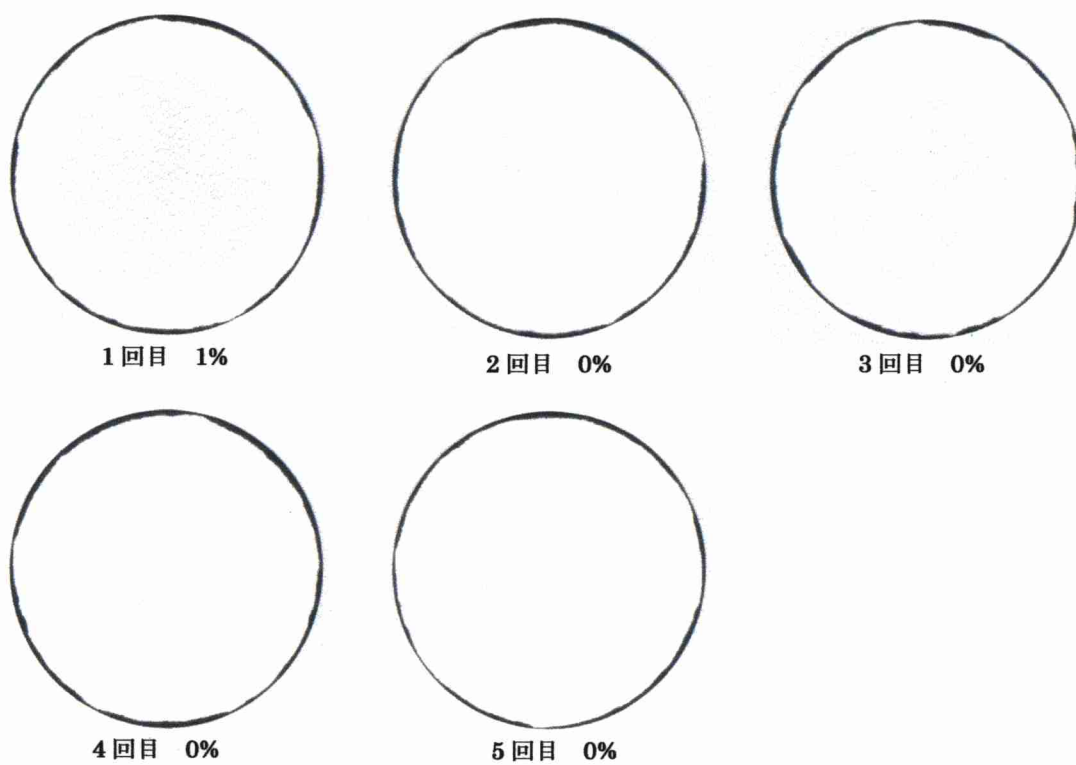


図 4.19 1回目捕集実験結果

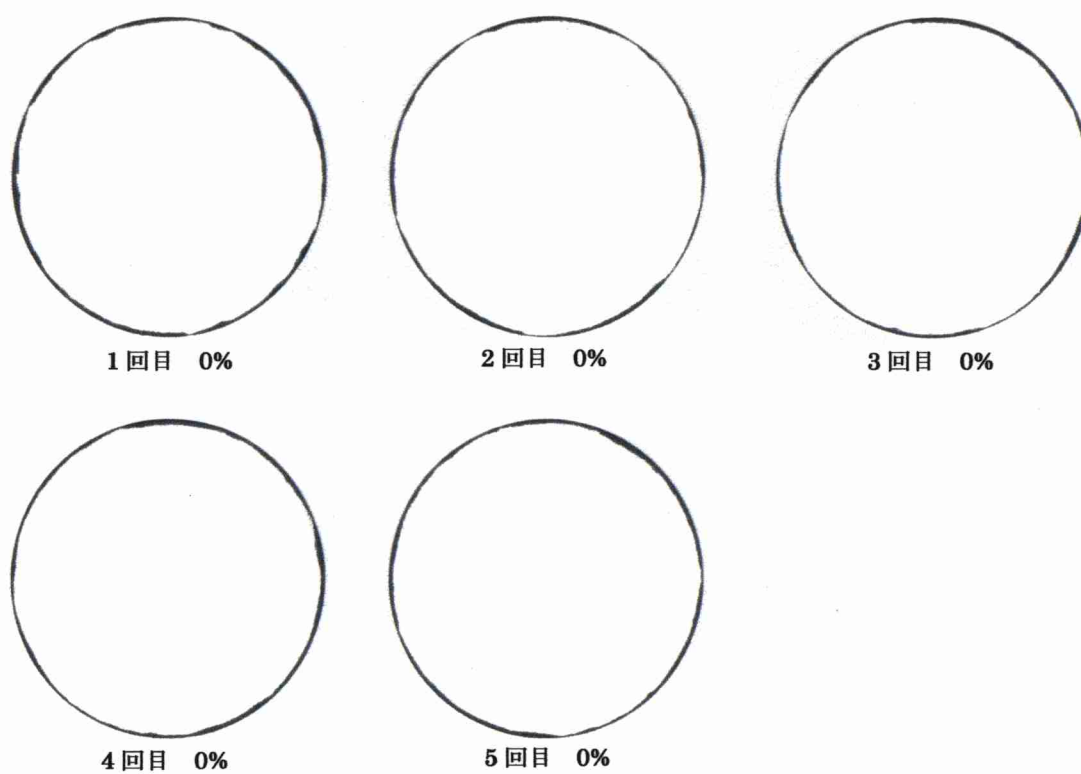


図 4.20 2回目捕集実験結果

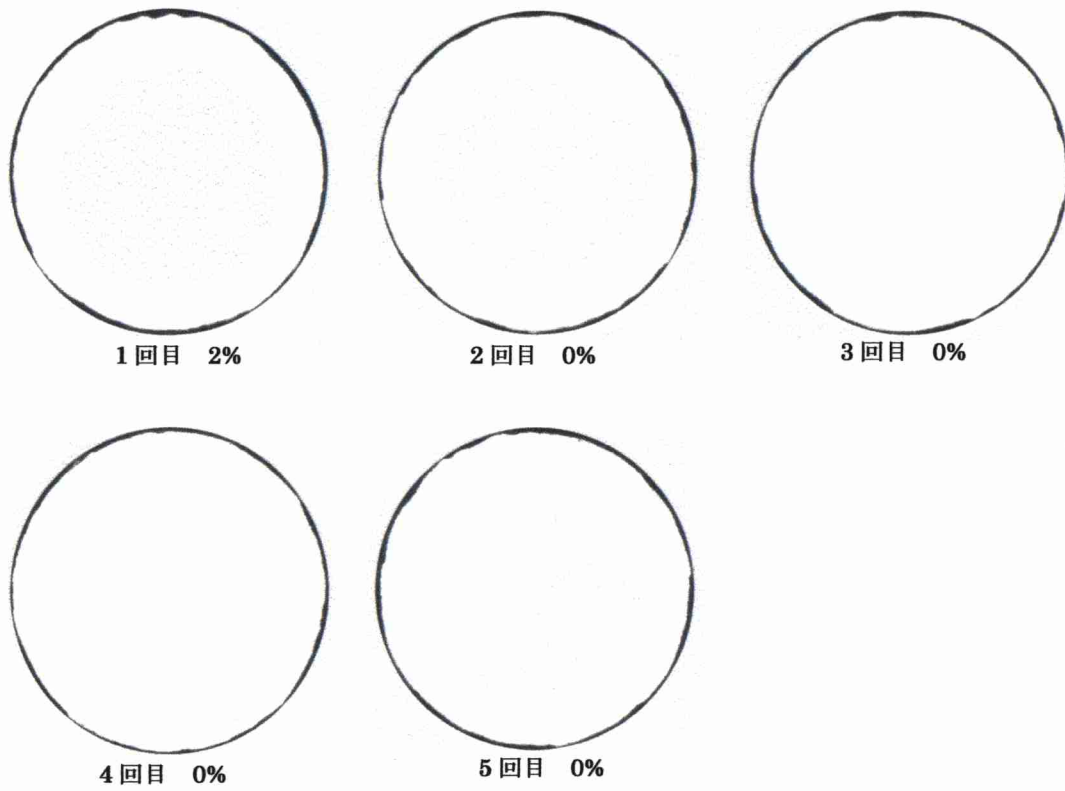


図 4.21 3回目捕集実験結果

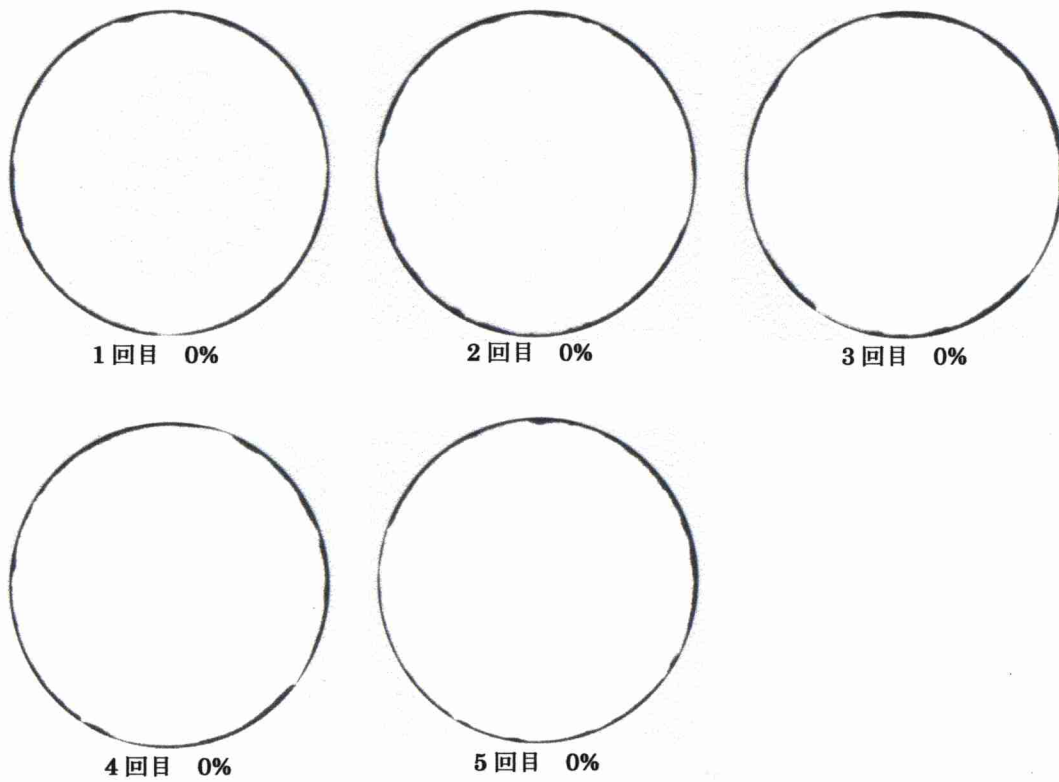


図 4.22 4回目捕集実験結果



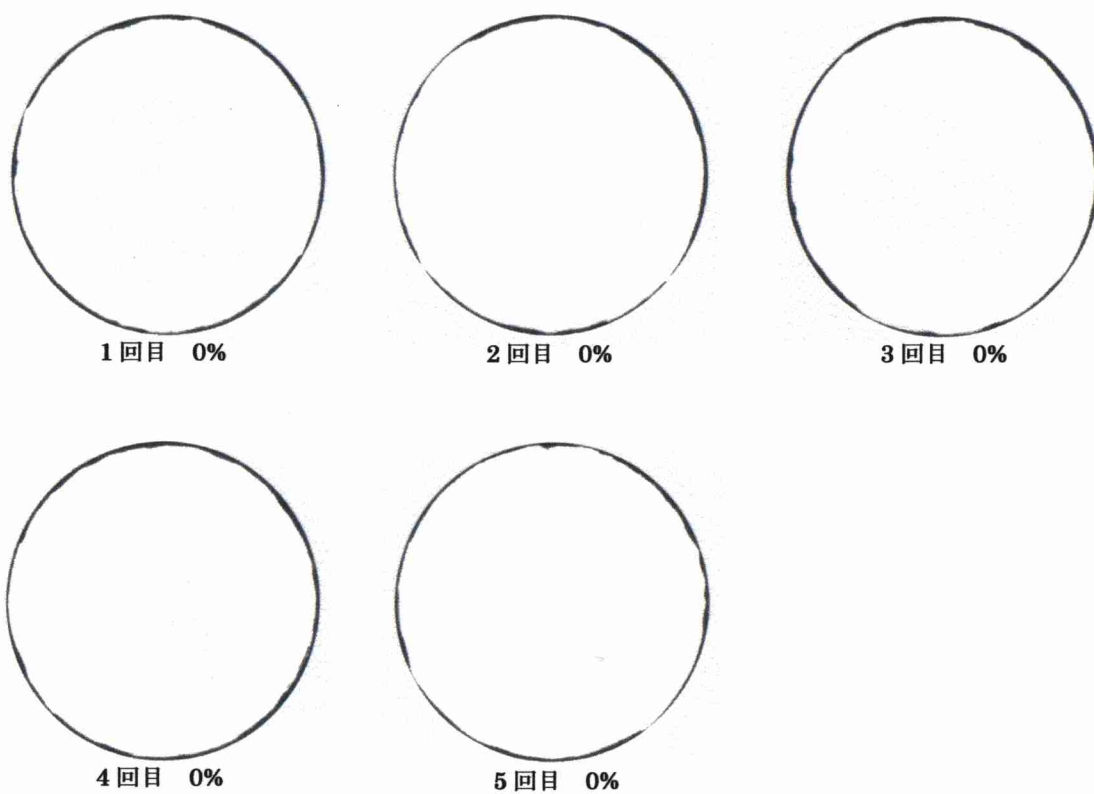


図 4.23 5回目捕集実験結果

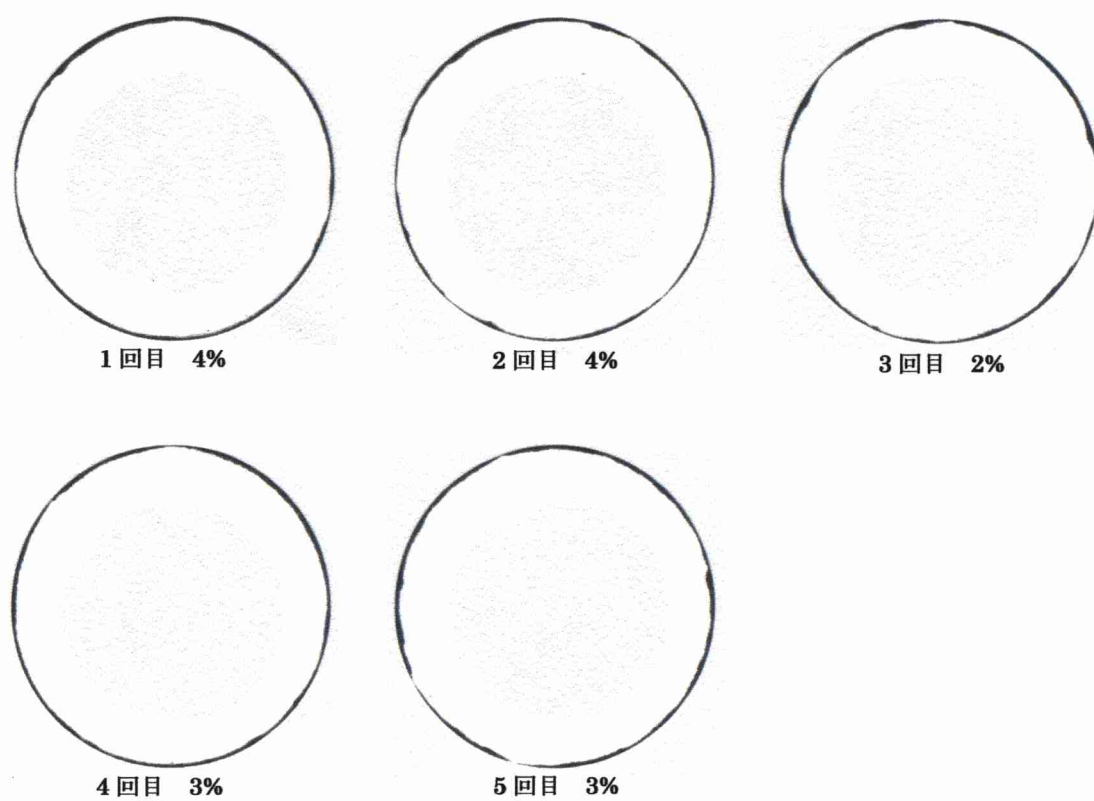


図 4.24 6回目捕集実験結果

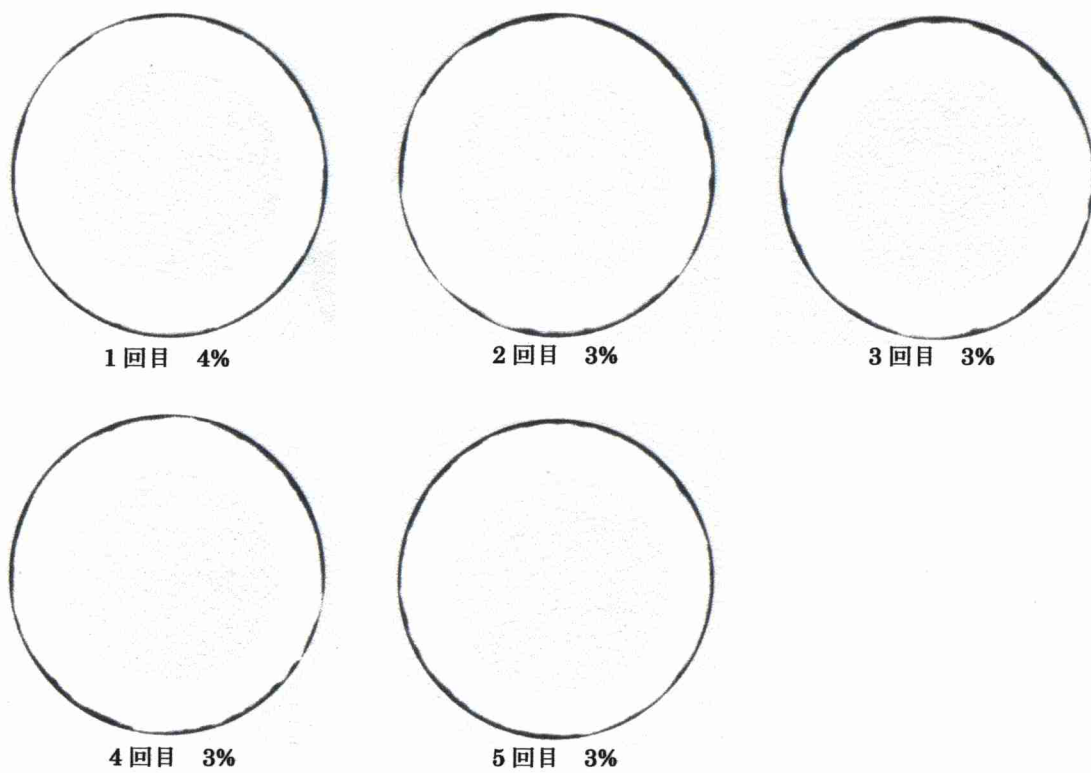


図 4.25 7回目捕集実験結果

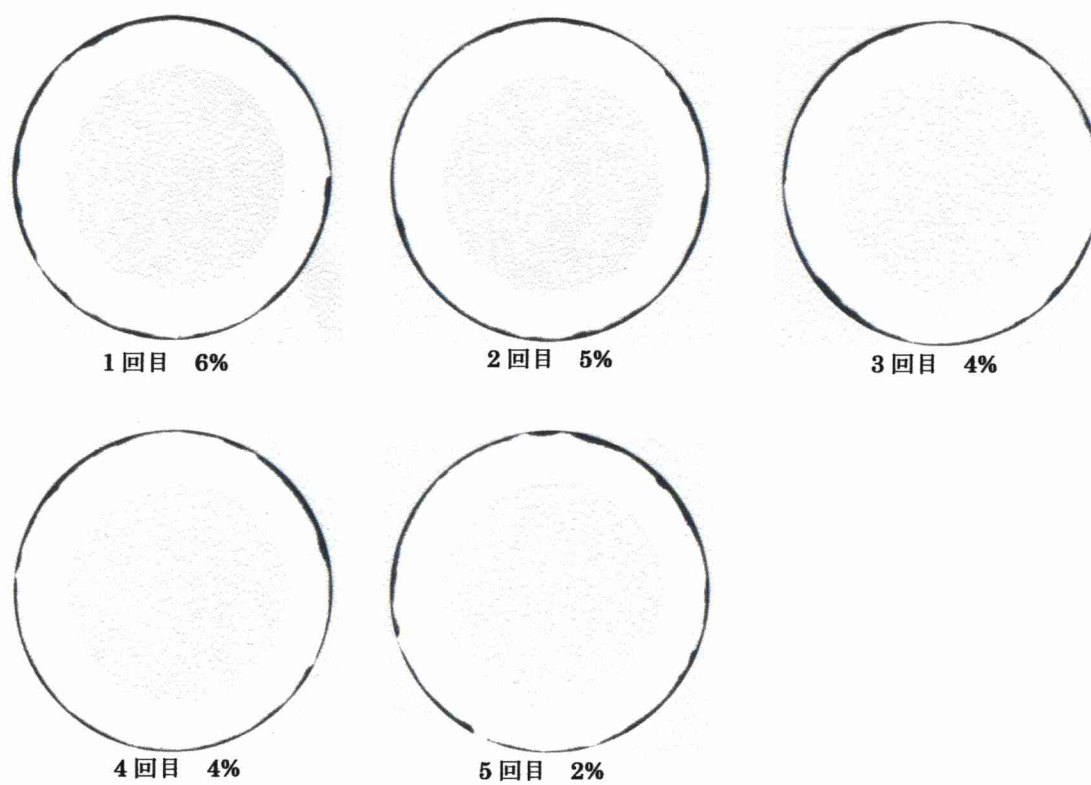


図 4.26 8回目捕集実験結果

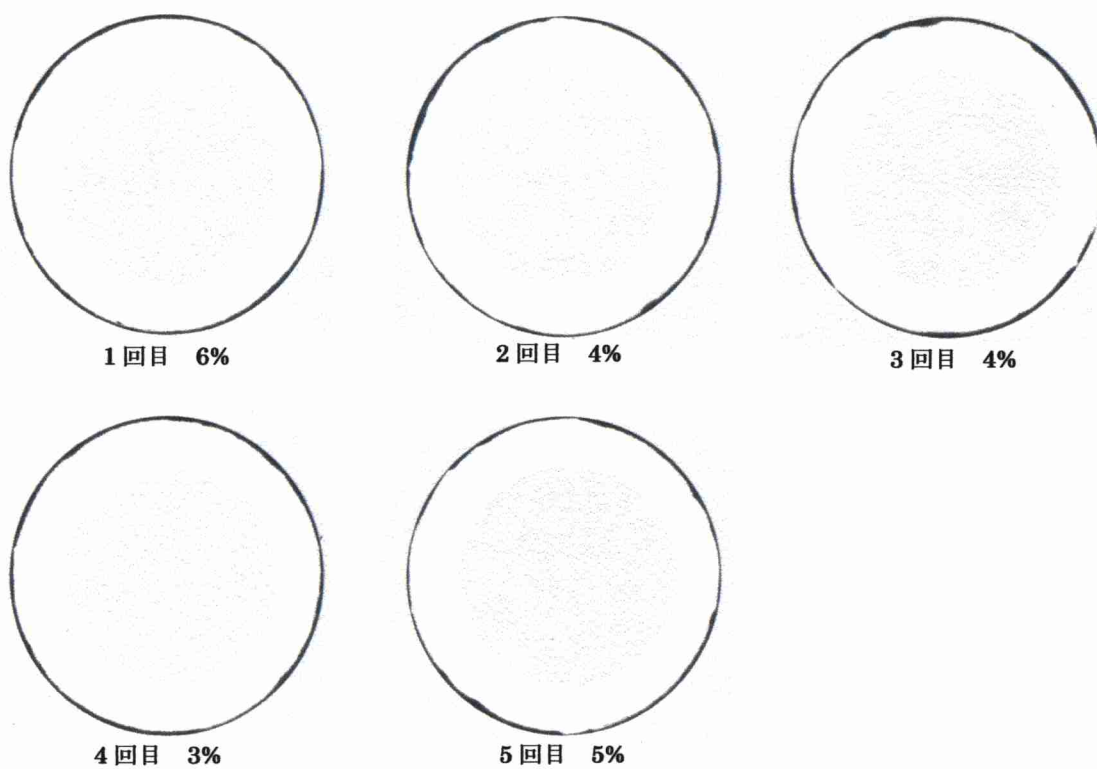


図 4.27 9回目捕集実験結果

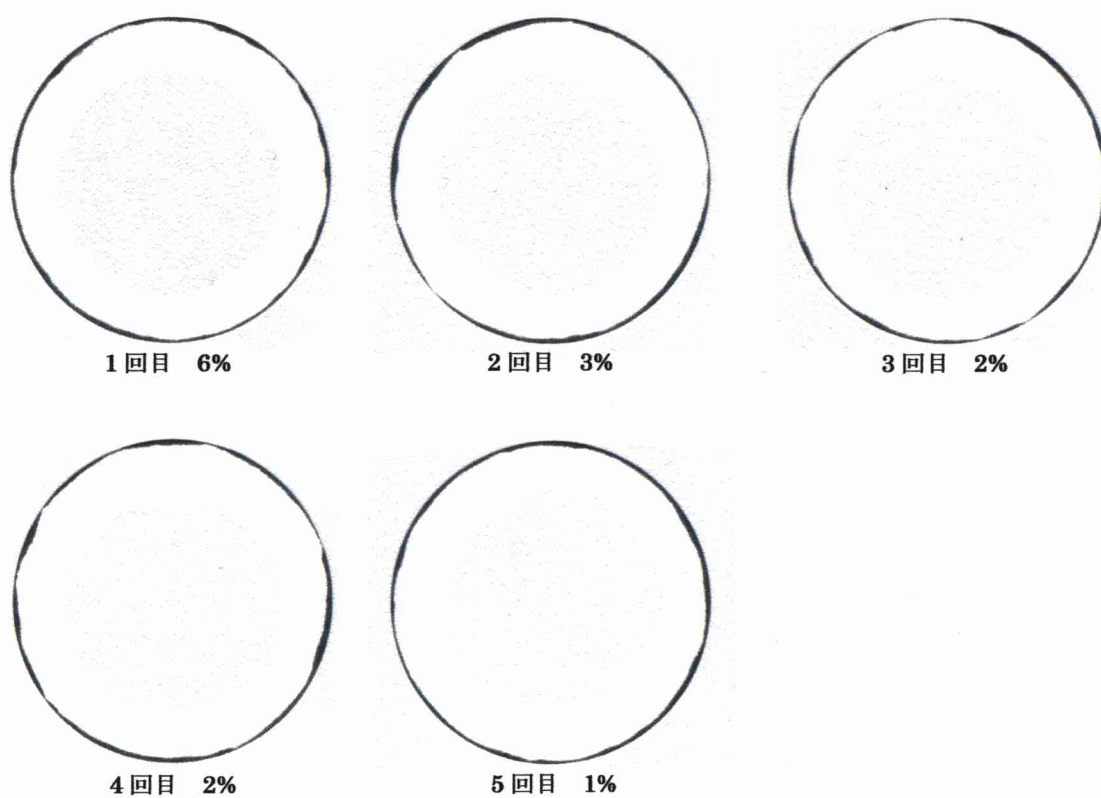


図 4.28 10回目捕集実験結果

### 4.3 円筒状金属フィルタ

#### 4.3.1 フィルタの目の粗さ選定

図 4.29 にろ材として SUS316L 繊維を使用した円筒状金属フィルタを示す。図に示すようにろ材である金属繊維を円筒の表面に配置し、ろ材の内側には、ろ材を排気ガスの圧力から保護するために SUS316L からなるパンチングメタル(3φ×5P)を配置した構造となっている。したがって、排気ガスは円筒の外周から入り、円筒の内側から出て行く流れとなる。今回使用したディーゼル発電機に適した金属繊維ろ材の目の粗さを選定するために、以下に示すような 3 種類の金属繊維ろ材を用いた捕集実験を行った。

(イ) 材質：SUS316L 目の粗さ：75 μm

(ロ) 材質：SUS316L 目の粗さ：60 μm

(ハ) 材質：SUS316L 目の粗さ：40 μm

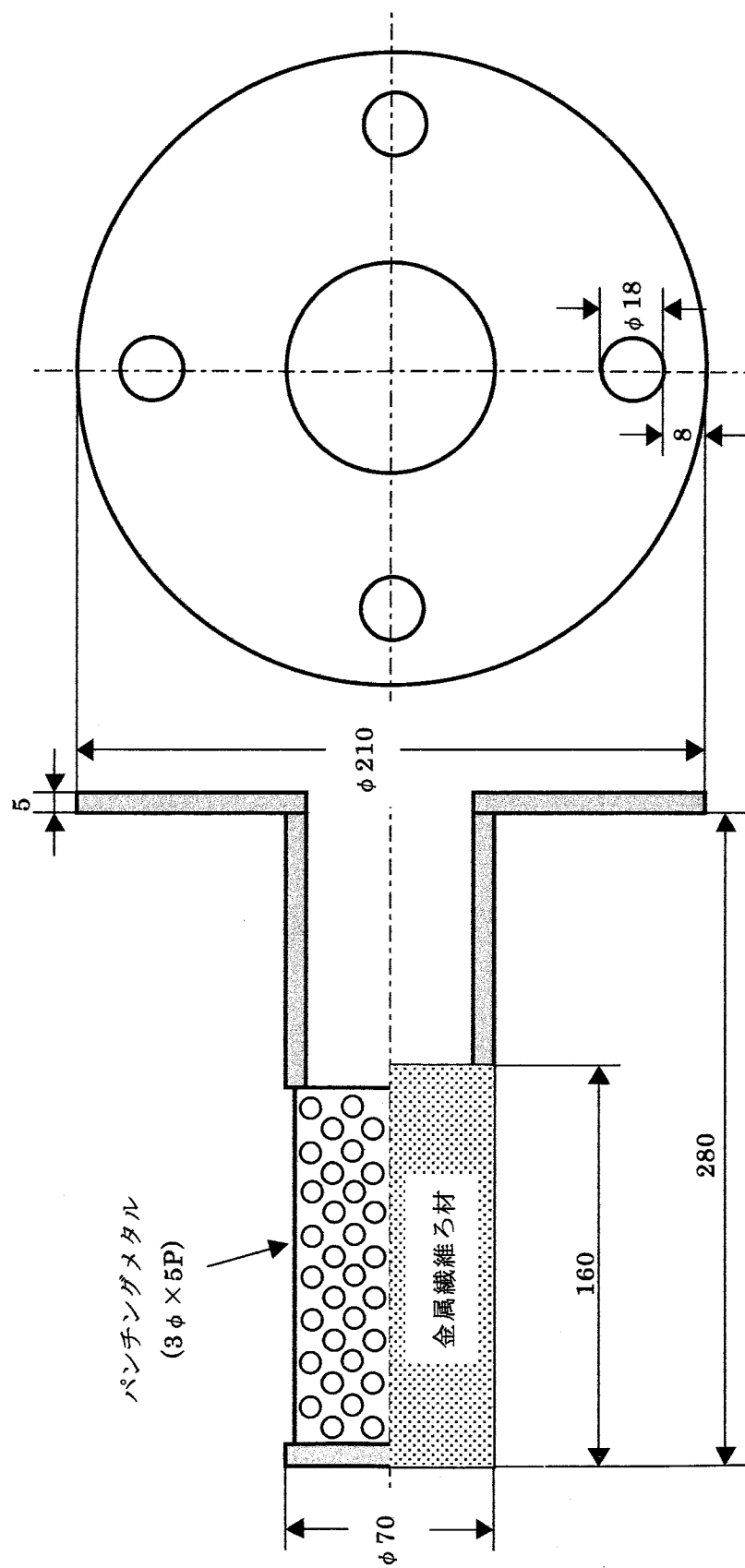
捕集実験の方法は、4.1 節で述べた捕集実験装置に金属繊維フィルタでの圧力損失を測定するため差圧計を設置した。本実験で使用した差圧計は、KEYENCE の圧力センサ AP-V41 とセンサヘッド AP-48 である。構造はダイヤフラム式となっており、定格圧力範囲が -101.3~+101.3kPa、表示分解能が 0.02kPa、検出誤差が ±0.2% となっている。実験時は、最大圧力損失を測定するように差圧計を設定する。そして捕集実験は、この最大圧力損失が 7kPa を超えた時点で金属繊維フィルタが目詰まりを起こしたと判断し、捕集実験を終了する。なお、ここで目詰まりを起こしたと判断する基準として、最大圧力損失 7kPa を採用した根拠は、船用 DPF を研究している(株)ササクラの資料<sup>(6)</sup>に基づいてである。

目の粗さ 75,60,40 μm の金属繊維フィルタを使用したときの捕集実験結果を表 4.6~4.8 に示す。また各フィルタでの圧力損失の推移を図 4.30 に示す。

表 4.6 75 μm での黒煙濃度と圧力損失の変化

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	12	4	11	0	6	0	0
圧力損失[kPa]	2.10	1.54	0.10	1.74	3.10	3.14	3.12

8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.06	3.26	3.36	3.64	3.92	4.18	4.54	4.98	5.24	5.54	5.92	6.58	7.26



(イ)	金属繊維ろ材	
	75 $\mu$ m	SUS316L
	60 $\mu$ m	SUS316L
(ロ)	40 $\mu$ m	SUS316L

図 4.29 円筒状金属フィルタ(SUS316L 繊維ろ材)の構造

表 4.7 60  $\mu\text{m}$  での黒煙濃度と圧力損失の変化

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	13	5	1	5	0	0	0
圧力損失[kPa]	2.74	2.88	2.90	2.96	3.08	3.26	3.74

8	9	10	11	12	13
0	0	0	0	0	0
4.32	5.12	5.88	6.54	6.92	7.36

表 4.8 40  $\mu\text{m}$  での黒煙濃度と圧力損失の変化

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7	8
黒煙濃度[%]	3	0	0	1	0	0	0	0
圧力損失[kPa]	3.00	2.98	2.92	3.78	4.42	5.34	6.12	7.12

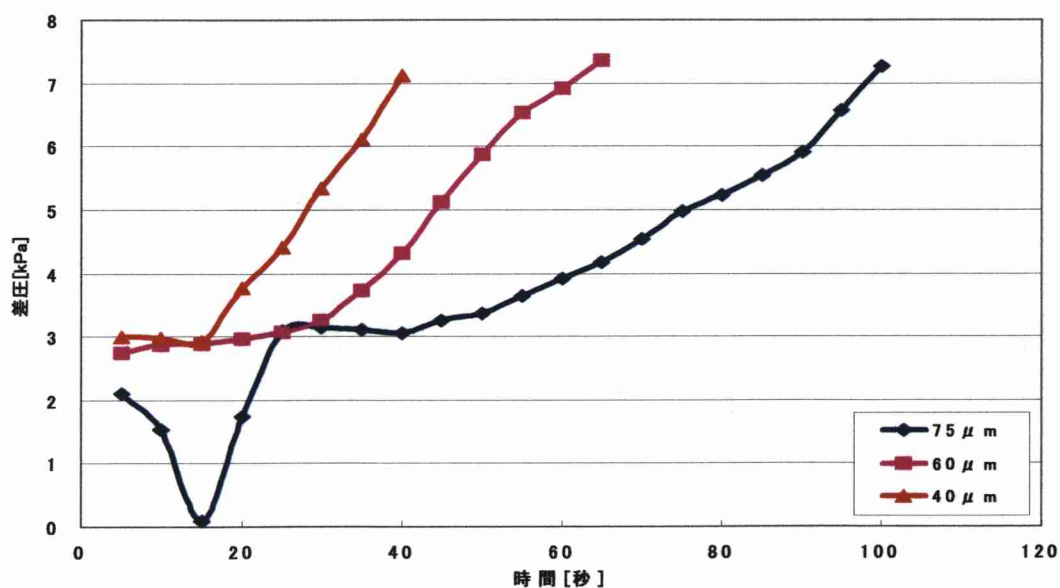


図 4.30 各フィルタでの圧力損失の推移

これらの捕集実験結果より最適な目の粗さを選定する。まず、言葉の定義として“連続黒煙発生時における捕集可能時間”は、本論文の捕集実験のように常に黒煙が排出されている条件下でフィルタが目詰まりを起こすまでの時間と定義する。また、“通常運転時の捕集可能時間”は、始動時および定常運転時を含んだ通常の運転状態においてフィルタが目詰まりを起こすまでの時間と定義する。

排出微粒子を捕集するフィルタに対する要求として“通常運転時の捕集可能時間が長い”ことが挙げられる。これは1つのフィルタにおける通常運転時の捕集可能時間を稼ぐことにより、もう一方のフィルタの加熱再生に要する時間を稼ぐことができるようになる。また、通常運転時の捕集可能時間が長いということは一日当たりにフィルタを再生する回数が減るということになる。これによりフィルタの加熱再生による劣化を抑制することが

でき、フィルタの寿命をのばすことができる。さらに、1日におけるフィルタの再生に要する電力量を低減することができる。また、フィルタを長期使用する観点から考えると、排出微粒子捕集後のフィルタを加熱再生すると排出微粒子の可燃性成分であるスス等は燃焼され除去することができる。しかし、灰分などの不燃性成分は燃焼せずにフィルタに堆積したままとなる<sup>(7)</sup>。すなわち、排出微粒子の捕集とフィルタの再生を繰り返すことにより灰分がフィルタに堆積し、目詰まりを起こすことが考えられる。したがって、フィルタの目が細かいと灰分によりフィルタが目詰まりを起こすまでの時間が短くなってしまう。ゆえに、フィルタの目のある程度粗くしておく必要がある。以上の考えから実験結果をまとめると表 4.9 のようになる。

表 4.9 連続黒煙発生時における捕集可能時間と最大黒煙濃度の比較

目の粗さ	連続黒煙発生時における捕集可能時間	最大黒煙濃度
75 $\mu\text{m}$	100sec	12%
60 $\mu\text{m}$	65sec	13%
40 $\mu\text{m}$	40sec	3%

目の粗さ 75  $\mu\text{m}$  と 60  $\mu\text{m}$  を比較すると、黒煙濃度に大きな差はない。しかし、連続黒煙発生時における捕集可能時間では、75  $\mu\text{m}$  の方が約 1.5 倍長く捕集できる。したがって 75  $\mu\text{m}$  の方がフィルタとして適している。次に 75  $\mu\text{m}$  と 40  $\mu\text{m}$  を比較すると、黒煙濃度は 40  $\mu\text{m}$  の方が低減できている。しかし、連続黒煙発生時における捕集可能時間をみると 75  $\mu\text{m}$  の方が 2.5 倍長く捕集できる。ここで実用化することを考えると 75  $\mu\text{m}$  の場合、目の細かいフィルタを 75  $\mu\text{m}$  のフィルタの後方に設置して何段階かに分けて捕集すれば黒煙濃度を低減することができる。さらに、粒子径別の捕集となるので背圧を抑制でき、捕集可能時間も比較的長くなると考えられる。一方、40  $\mu\text{m}$  の場合、フィルタの捕集面積を拡張すれば連続黒煙発生時における捕集可能時間を長くすることができる。しかし、1つのフィルタで全ての大きさの粒子を捕集するため比較的背圧が高くなり、捕集可能時間も短くなると考えられる。したがって、今回 75  $\mu\text{m}$  の粗さのフィルタを使用することとする。また、目の粗さ 75  $\mu\text{m}$  のフィルタでの通常運転時の捕集実験結果を表 4.10 に示す。この結果、エンジン始動直後から始動後 1 時間までフィルタでの圧力損失は 3.12kPa のままであった。したがって、通常運転時において相当な時間、捕集可能であることが分かる。

表 4.10 目の粗さ 75  $\mu\text{m}$  のフィルタにおける通常運転時の捕集実験結果

運転時間 [分]	圧力損失 [kPa]						
5	3.12	20	3.12	35	3.12	50	3.12
10	3.12	25	3.12	40	3.12	55	3.12
15	3.12	30	3.12	45	3.12	60	3.12



### 4.3.2 円筒状金属フィルタの構造

次にフィルタの加熱再生時の高温状態に耐えるろ材として「ベクラリ」を使用した。このベクラリは、最高使用温度 1000℃で表 4.11 に示すような成分の合金である。形状としては、図 4.31 に示すような金属繊維を焼結させた焼結不織布ろ材となっている。金属不織布ろ材の特徴として高い空隙率が上げられる。通常その空隙率は 60～85%であり、それにより低圧力損失でありながら高い透過流量が得られる(表 4.12 参照)。また、ろ材構成にもよるが、一般的に金属不織布ろ材は深層ろ過によって三次元的に異物を取り込むため優れた異物捕集能力も兼ね備えている<sup>(8)</sup>。さらにセラミックに比べて耐熱性・機械的強度に優れており、硫化物に対する耐腐食性も有している。したがって、大きな振動を受ける船用 DPF のフィルタとして適していると考えられる。また、磁性体となっている。

表 4.11 ベクラリの主な成分

成分	Ave.	Max.
Cr	19.50	20.50
Fe	balance	
Al	4.55	4.95
Y	0.25	0.30



図 4.31 不織布ろ材

表 4.12 金属繊維ろ材と無機焼結粉末ろ材との水の透過流量比較<sup>(8)</sup>

フィルタエレメント	実際の水の透過流量 [ℓ/h・m <sup>2</sup> ・bar]
金属繊維の焼結品 ろ過粒度 4 μm	約 520000
ステンレス粉末の焼結品 ろ過粒度 4 μm	約 30000

ろ材としてベクラリを使用した円筒状金属フィルタの構造を図 4.32 に示す。捕集部は表面がベクラリになっており、目の粗さは約 75 μm である。そして、円筒状フィルタの外径は 67mm で長さが 160mm となっており、捕集部の面積は、約 336.8cm<sup>2</sup>である。また、ベクラリの内側にはベクラリを排気ガスの圧力から保護するために φ3×4P のパンチングメタルを配置している。このパンチングメタルの穴の占有率は約 51%である。材質としては、磁性体であるベクラリ以外のフランジおよび捕集部内部のパンチングメタルは非磁性体である SUS316L を使用している。したがって、誘導加熱時には、ろ材であるベクラリが最も加熱される。



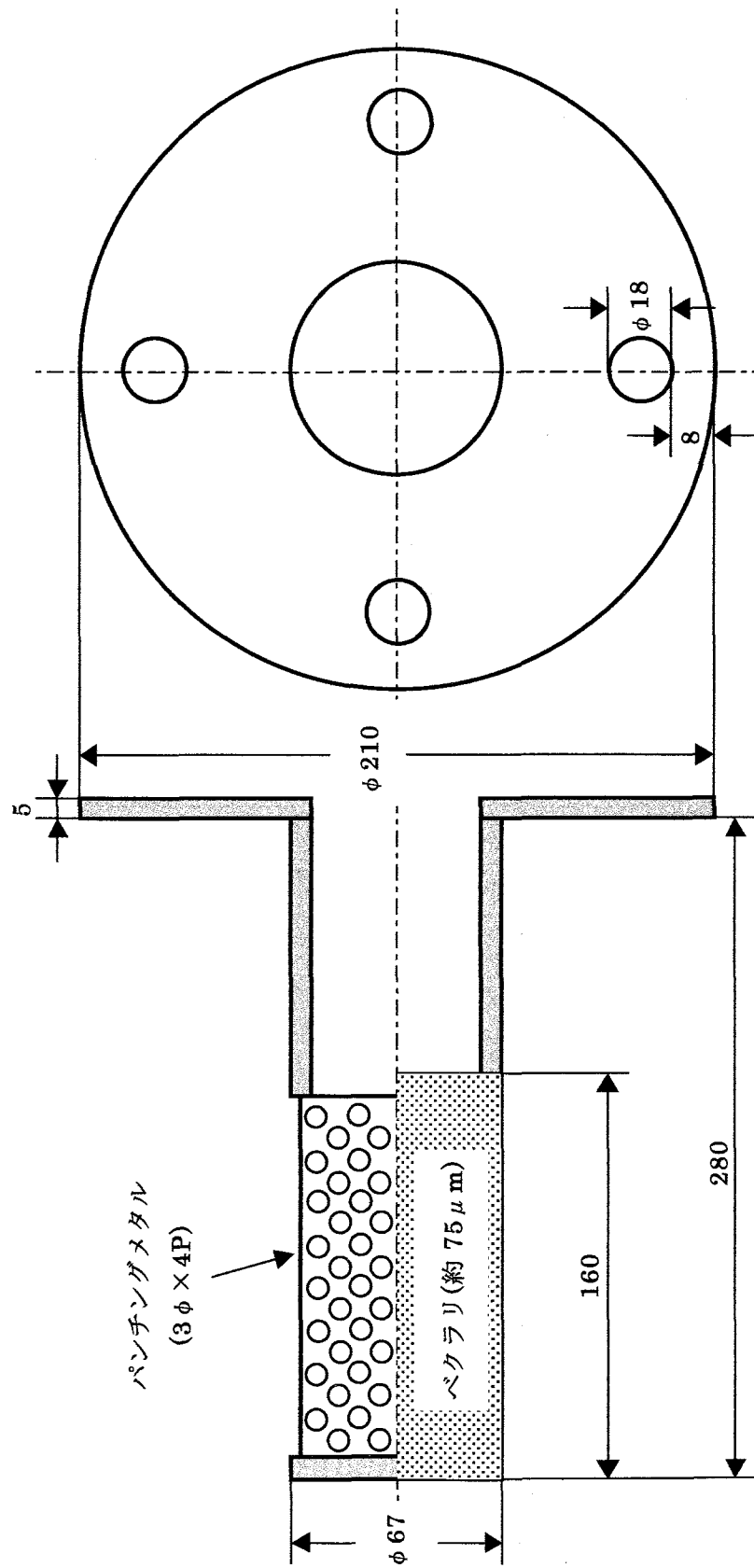


図 4.32 円筒状金属フィルタ(ベクラリ使用)の構造

### 4.3.3 円筒状金属フィルタによる捕集実験と加熱再生実験

次に円筒状金属フィルタのろ材としてベクラリを使用した際の捕集実験および加熱再生実験について検討する。4.3.1 節と同様に捕集実験を行った結果を表 4.13 および図 4.33 に示す。この捕集実験での排出微粒子低減率(4.2.2 節参照)は、96.2%となっている。また、フィルタで捕集した排出微粒子を図 4.34 に示す。この図から分かるように捕集した排出微粒子は、多数の小さな微粒子が集まってできており、その塊の大きさは数 $\mu\text{m}$ から10 $\mu\text{m}$ 程度となっている。このようにフィルタの目の粗さより小さな微粒子も捕集することが可能であることが分かる。そして、捕集実験の後、入力電力 5kW で約 1 分間加熱して排出微粒子の燃焼除去を試みた。その結果、図 4.33 に示すように排出微粒子を捕集して黒くなったフィルタが加熱処理することにより大部分の排出微粒子が燃焼除去され、フィルタが再生されたのが分かる。また、円筒状セラミックフィルタにおける加熱再生実験と比較すると加熱時間が 40 分から 1 分となり 1/40 に短縮することができた。さらにフィルタの加熱再生に要した電力量は、1.46kWh から 0.081kWh となり約 1/18 に抑制することができた。

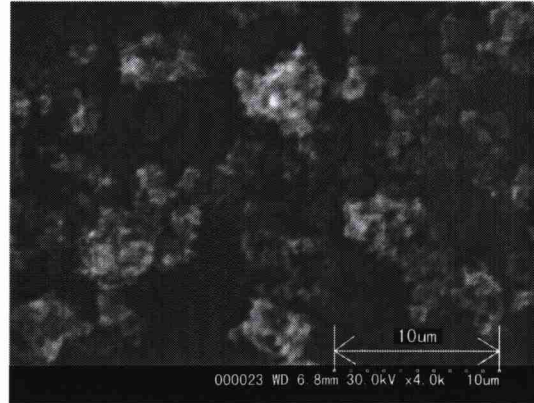


図 4.34 排出微粒子(4000 倍)

表 4.13 フィルタ誘導加熱処理前の捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	10	15	10	0	0.5	0	0
圧力損失[kPa]	3.24	3.16	3.10	3.16	3.10	3.80	4.18

8	9	10	11	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	0	0	3.2	96.2
4.68	5.58	6.60	7.32	4.36	-



捕集前



捕集後



加熱処理後

図 4.33 フィルタの比較

## 第5章 高周波誘導加熱電源

### 5.1 ハードスイッチングとソフトスイッチング

#### 5.1.1 ハードスイッチング

パワーエレクトロニクスでは、MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)やIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)、サイリスタなどの半導体素子をスイッチとして使用している。そしてこのスイッチのオン・オフによってエネルギーの流れと電力を制御している。今、理想スイッチを使用したと考えると、スイッチのターンオンおよびターンオフ時におけるスイッチング損失は原理的にゼロとなる。しかし、実際には半導体スイッチは理想スイッチではなく、有限のスイッチング時間を持っている。そのためスイッチング時にはスイッチ電流とスイッチ電圧が重複する期間が存在する。すなわち、図 5.1 に示すようにスイッチング時に  $I_s$ (スイッチ電流)  $\times$   $V_s$ (スイッチ電圧) で表されるスイッチング損失が生じる。また、回路には、配線のインダクタンスや浮遊容量などがある。これらによってスイッチング損失やサージ電流、サージ電圧が発生し、スイッチの発熱や破壊さらに機器自体の性能低下とノイズによる周辺の電子機器への悪影響が考えられる。

サージ電流の発生原理は、スイッチの静電容量  $C_{ce}$  と電圧の変化によって生じる。この関係を式に表すと以下ようになる。

$$I_{sug} = C_{ce} \times dV_c/dt \approx C_{ce} \times \Delta V_s / \Delta t$$

つまり、スイッチの静電容量が小さくても、電圧の変化が急激であればサージ電流が過大に発生することになる。また、サージ電圧の発生原理は、配線のインダクタンスやトランスを使用した際の漏れインダクタンスといったインダクタンス成分( $L$ )と電流の変化によって生じる。この関係を式に表すと以下ようになる。

$$V_{sug} = L \times di/dt \approx L \times \Delta I_s / \Delta t$$

つまり、配線のインダクタンスや漏れインダクタンスといったインダクタンス成分が小さい場合でも、電流の変化が急激であればサージ電圧が過大に生じることになる。したがって、ハードスイッチング回路では、サージ電流やサージ電圧を抑制するためにスナバ回路を設けている。スナバ回路の一例として図 5.2 に R-C スナバ回路を示す。スイッチがターンオフするとコンデンサ  $C_s$  は充電されはじめる。このコンデンサ  $C_s$  の充電時間が、スイッチ電圧  $V_s$  がゼロから立ち上がる速さを支配する。次にスイッチがターンオンすると  $C_s$  はスイッチを通して放電する。しかし、この際放電電流によってスイッチにサージ電流が発生し、スイッチ

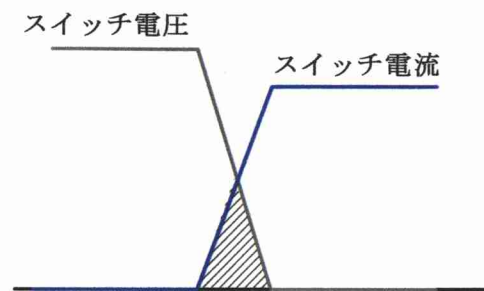


図 5.1 スwitchング損失

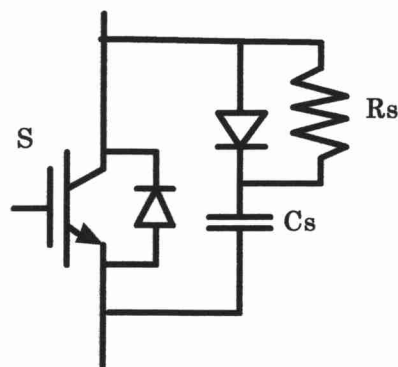


図 5.2 R-C スナバ回路

を破壊してしまう恐れがある。それを防止するために抵抗  $R_s$  を介して放電することによりサージ電流を抑制する。このようにスナバ回路でサージ電流を吸収する際に抵抗において電力損失が発生してしまう。そして、この電力損失のため電力変換効率が低くなるというデメリットがある。一方でハードスイッチングは回路パラメーターや動作周波数に関係なく広い動作領域を有するというメリットもある。

### 5.1.2 ソフトスイッチング

前述のハードスイッチングにおけるスイッチング損失の低減とサージの発生を抑制する抜本的な解決策がソフトスイッチング技術である。すなわち、半導体スイッチがターンオンまたはターンオフする際にスイッチに流れる電流またはスイッチにかかる電圧を減少させてスイッチング損失を低減する技術である。これによりスイッチング時のサージ電流、サージ電圧の発生を抑制することもできる。

ソフトスイッチング技術は、スイッチに直列にコイル  $L$  を追加する ZCS(Zero Current Switching)方式とスイッチに並列にコンデンサー  $C$  を追加する ZVS(Zero Voltage Switching)方式の2つに分けることができる。ZCS方式は、図 5.3 に示すように電流の共振現象を利用して、スイッチ電流がゼロクロスした後のダイオード電流が流れている期間にスイッチングする技術である。

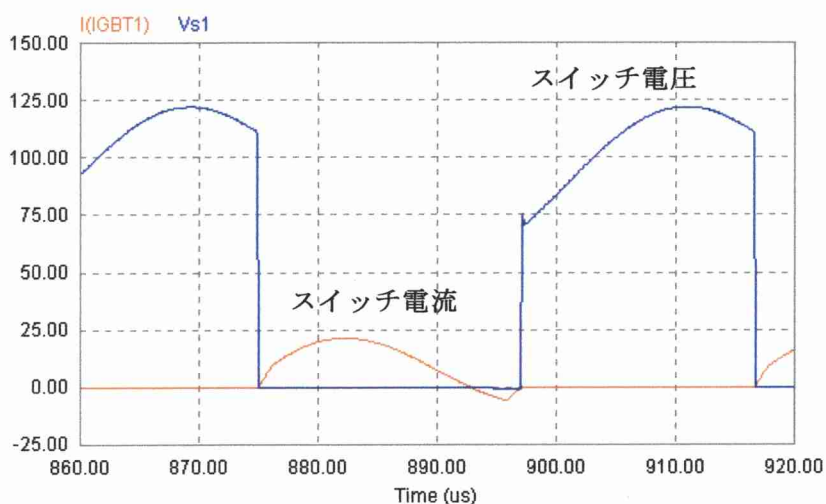


図 5.3 Zero Current Switching 波形

ダイオード電流が流れている時は、スイッチ電流がゼロである。したがって、ターンオフ時のスイッチング損失はゼロとなる。しかし、ターンオン時は有限のスイッチング時間のため図 5.4 のようにスイッチ電流とスイッチ電圧の重複する期間が存在し、スイッチング損失が発生する。このスイッチング損失は、ハードスイッチングの時と比べると電流の傾きが小さいため抑制されている。ZVS方式は、図 5.5 に示すように電圧の共振現象を利用して、スイッチに逆並列に接続されているダイオードが導通している期間、つまりスイッチ電圧がゼロの時にスイッチングする技術

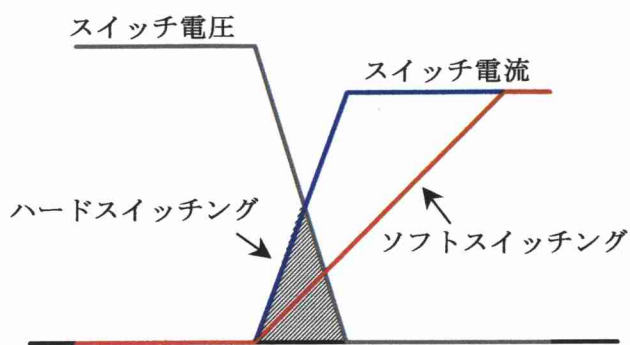


図 5.4 スwitchング損失の比較



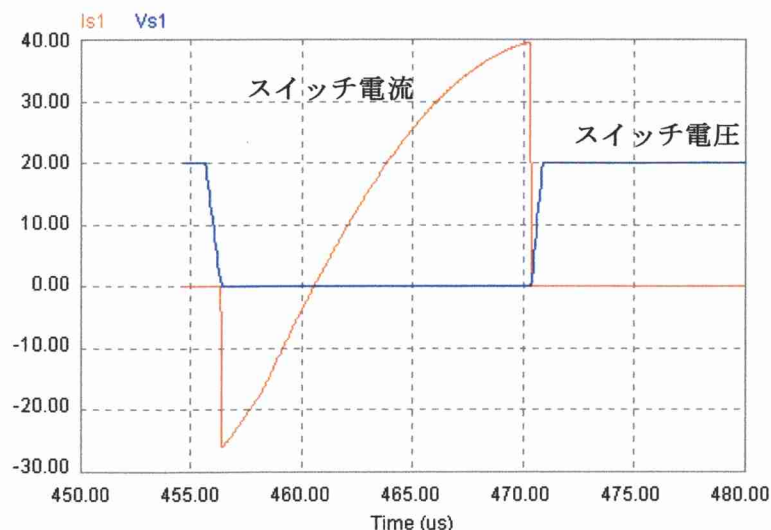


図 5.5 Zero Voltage Switching 波形

である。ダイオード電流が流れている時は、スイッチ電圧はゼロである。したがって、ターンオン時のスイッチング損失はゼロとなる。しかし、ターンオフ時には有限のスイッチング時間のためスイッチ電流とスイッチ電圧が重複する期間が存在し、スイッチング損失が発生する。このスイッチング損失は、ハードスイッチング時と比べると電圧の傾きが小さいため抑制されている。

このようにソフトスイッチング技術を利用することによりハードスイッチング時と比べてスイッチング損失を抑制することができ、電力変換効率を高めることができるというメリットがある。しかし、一方で通常のハードスイッチングと比べて少なくともコイル  $L$  またはコンデンサー  $C$  を追加する必要があり回路が複雑になり使用素子数が増加してしまう。特に  $L$  は、鉄損をなくすため空芯のコイルを使用すると、コイルが大型化する。さらに  $L$  には高周波電流が流れ、しかも大振幅で動作するため高周波損失を招き、コイルに含まれる抵抗成分によるジュール熱損失により発熱する。また、ソフトスイッチング回路においてソフトスイッチングによる安定動作が可能な領域が限られてしまう。そのため誘導加熱などの負荷定数が増加する場合には、安定動作を維持する領域が非常に狭くなってしまうというデメリットもある。



## 5.2 複合共振 ZCS 高周波インバータ

### 5.2.1 新しい複合共振回路

図 5.6 に複合共振 ZCS 高周波インバータを示す。この複合共振回路に対する従来の考え方は、負荷( $L_o, R_o$ )に並列に接続されたキャパシタンス  $C_p$  の効果により、スイッチ電流最大値( $I_{smax}$ )を抑制して負荷に大電流( $I_{omax}$ )を流すというものであった(図 5.7 参照)。すなわち出力電流最大値( $I_{omax}$ )とスイッチ電流最大値( $I_{smax}$ )との比( $I_{omax}/I_{smax}$ )で表される電流振幅率が 1 より大きくなるように共振回路を設計することで複合共振回路のメリットを引き出すことができると考えていた。しかし、入力電圧一定の条件下では、電流振幅率を大きくすると十分な出力電力が得られにくく、負荷抵抗が大きくなると電流振幅率を大きくできない、あるいは十分な出力電力を得ることができないといった問題があった。したがって、従来の複合共振回路は、負荷抵抗が小さく、かつ比較的输出電力が小さいもの(1~2kW)に適していたと考えられる。ここで船用機関からの排出微粒子低減システムについて考えると負荷抵抗が大きくなり、かつ高出力が必要になると考えられる。そのため従来の考え方による複合共振回路は、本システムの誘導加熱電源としては不向きであった。そこで、入力電圧一定の条件下で負荷抵抗が大きくなっても高出力を引き出すことのできる複合共振回路に対する新しい考え方を次頁に示す。

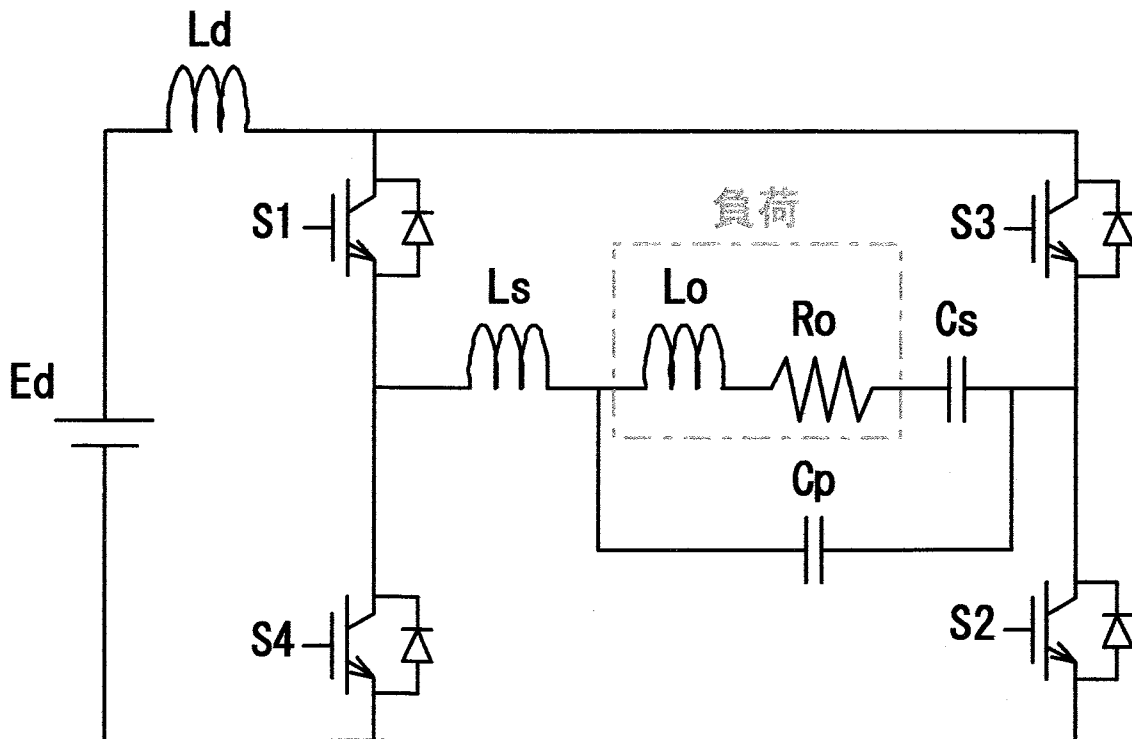


図 5.6 複合共振 ZCS 高周波インバータ

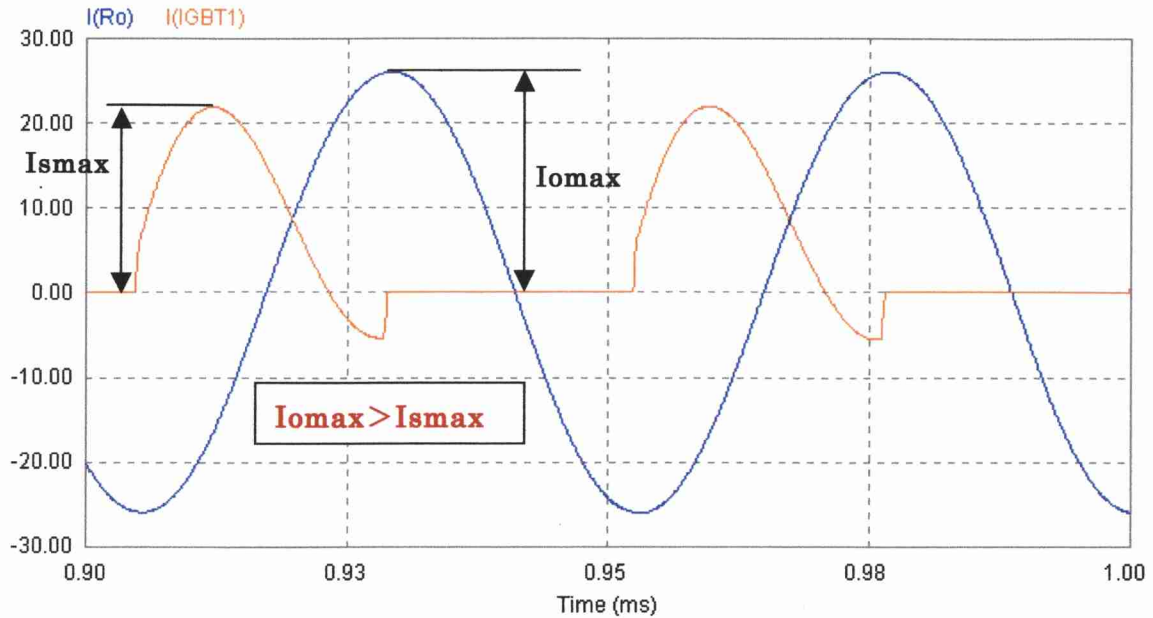


図 5.7 従来の複合共振回路の考え方

一般に電圧源型電流共振インバータでは、図 5.8 に示すような共振状の電流がスイッチに流れる。そこで図 5.8 の斜線部で示す共振状電流の外側を利用することができればスイッチの利用率を高めることができ、従来の電流共振インバータよりも更なる高出力化が狙えると考えられる。そこで図 5.9 に示すように動作周波数(1 次の波)に対して 3 倍の周波数の波形(3 次の波)を乗せることができれば台形波に近い波形を作ることができると考えた。この考え方を複合共振回路に適用すると、図 5.10 に示すように 1 次の波形を  $L_s \cdot L_o \cdot R_o \cdot C_s$  によって決まる共振周波数の波と考え、3 次の波形を  $L_s \cdot C_p$  で決まる共振周波数の波と考える。すなわち、複合共振回路を 1 次と 3 次の波を発生する回路として考えるというものである。このように考えることにより図 5.8 の斜線部を利用することができる。したがって、スイッチ電流波形を共振状から台形波状にすることにより入力電圧が等しい場合、従来の複合共振回路の考え方よりも出力電力を増すことが可能となると考えられる。ここで複合共振回路に対する従来の考え方におけるシミュレーション結果を図 5.11 に示し、本論文で提案する考え方によるシミュレーション結果を図 5.12 で示す。これらを比較すると本論文で提案する考え方による複合共振回路のスイッチ電流波形は、従来の考え方による複合共振回路の共振状スイッチ電流波形の外側を利用することができている。また、それぞれの出力電力を比較すると従来の考え方による複合共振回路では、7.5kW であるのに対して本論文で提案する考え方による複合共振回路では、25.4kW となっており約 3.4 倍の出力増強に成功している。このシミュレーション結果より本論文で提案する理論の正当性が実証された。さらに回路パラメーターに着目すると、従来の考え方による複合共振回路では、コンデンサー( $C_s + C_p$ )が  $4.44 \mu F$ 、インダクタンス( $L_s$ )が  $38 \mu H$  となっている。それに対して本論文で提案する考え方による複合共振回路では、コンデンサーが  $0.85 \mu F$ 、インダクタンスが  $19 \mu H$  となっている。このようにコンデンサーを約 1/5、インダクタンスを 1/2 の大きさに小型化しながら、かつ出力を増強することができた。

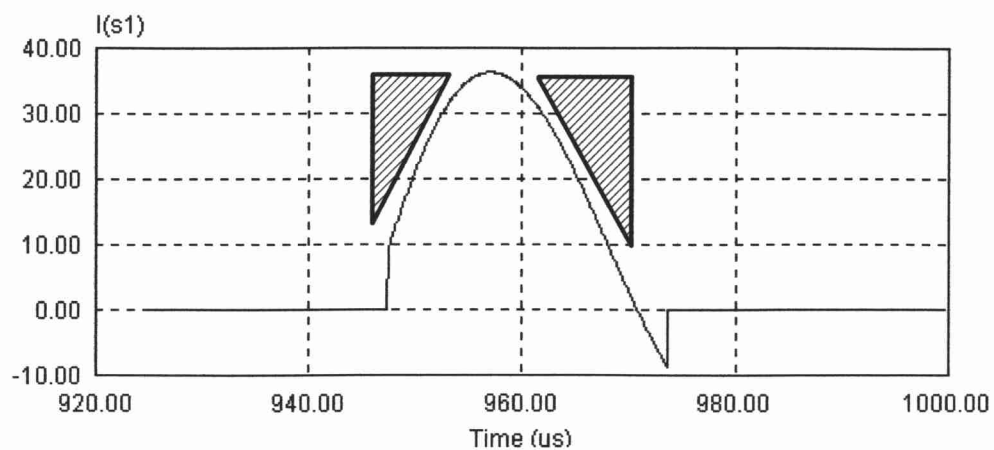


図 5.8 スイッチの有効利用

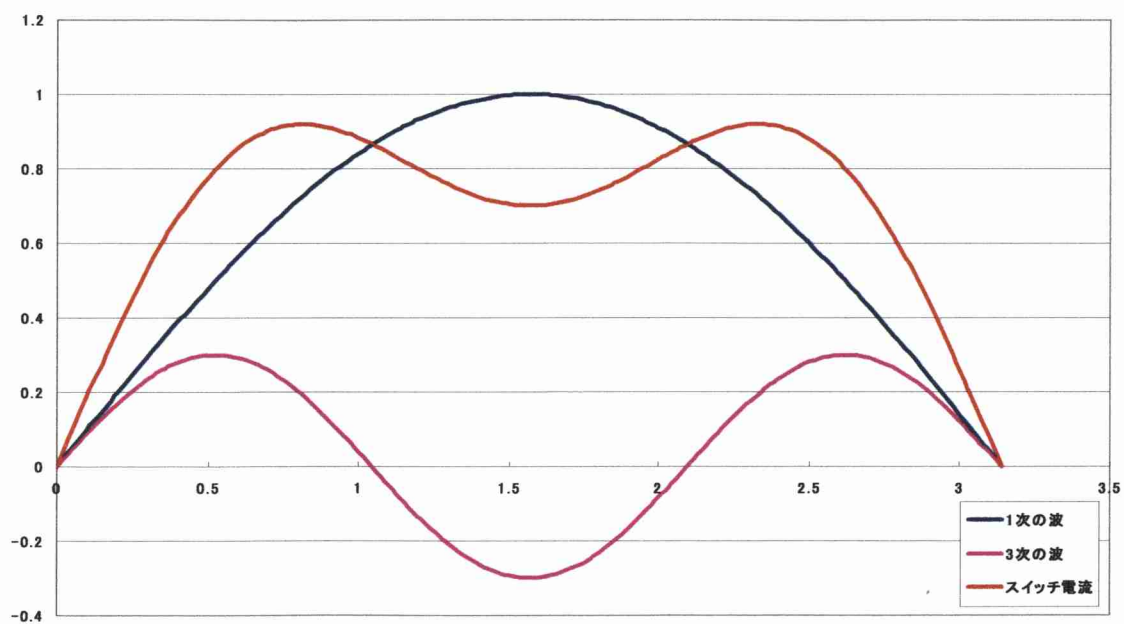


図 5.9 一次の波形と三次の波形の利用

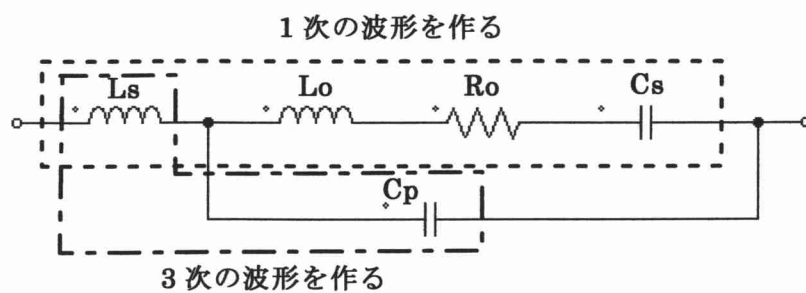
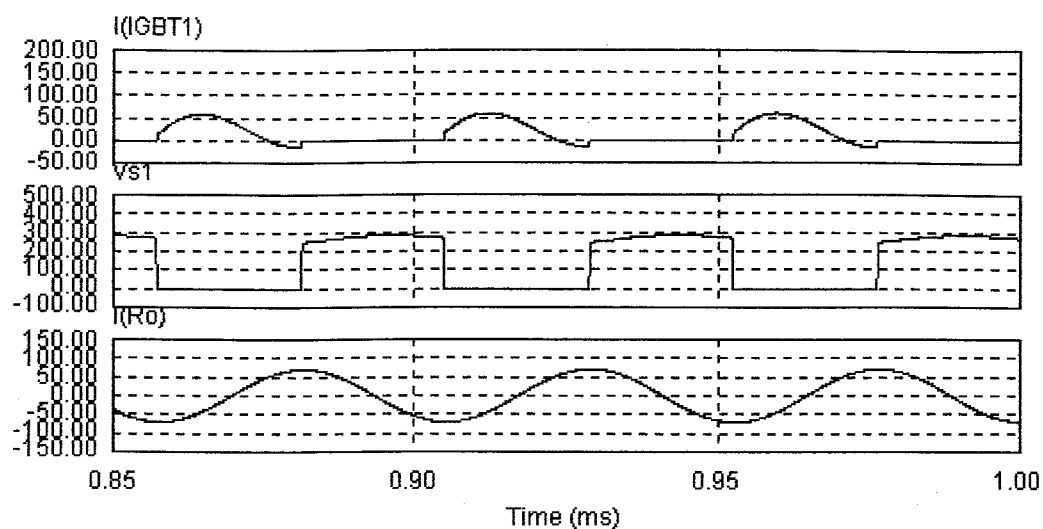
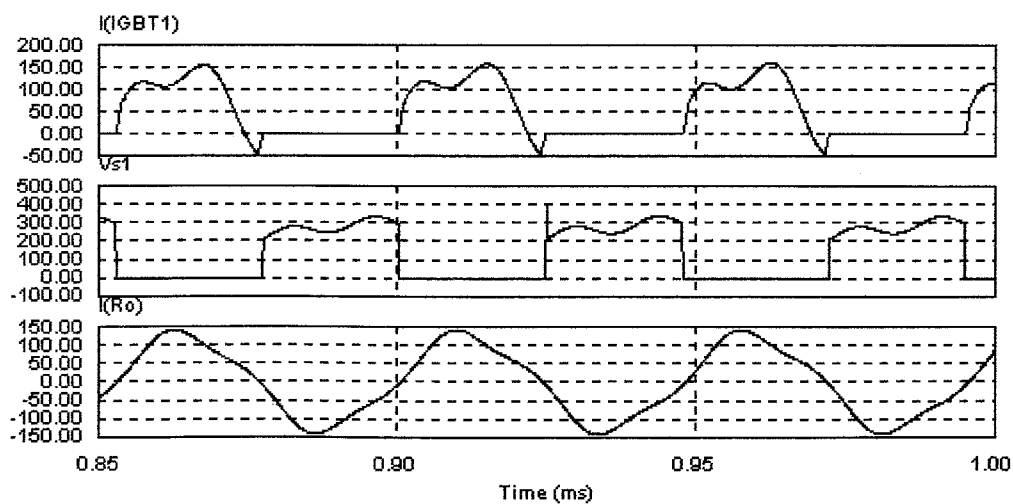


図 5.10 複合共振回路の新たな考え方



$E_d=270V, L_o=75\mu H, R_o=3\Omega, L_d=4\mu H, L_s=38\mu H, C_s=2.96\mu F, C_p=1.48\mu F, f_s=21kHz$   
 $I_{smax}=59.5A, V_{smax}=284.3V, I_{omax}=70.3A, I_{orms}=50.0A, P_o=7.5kW$

図 5.11 従来の考え方による複合共振回路



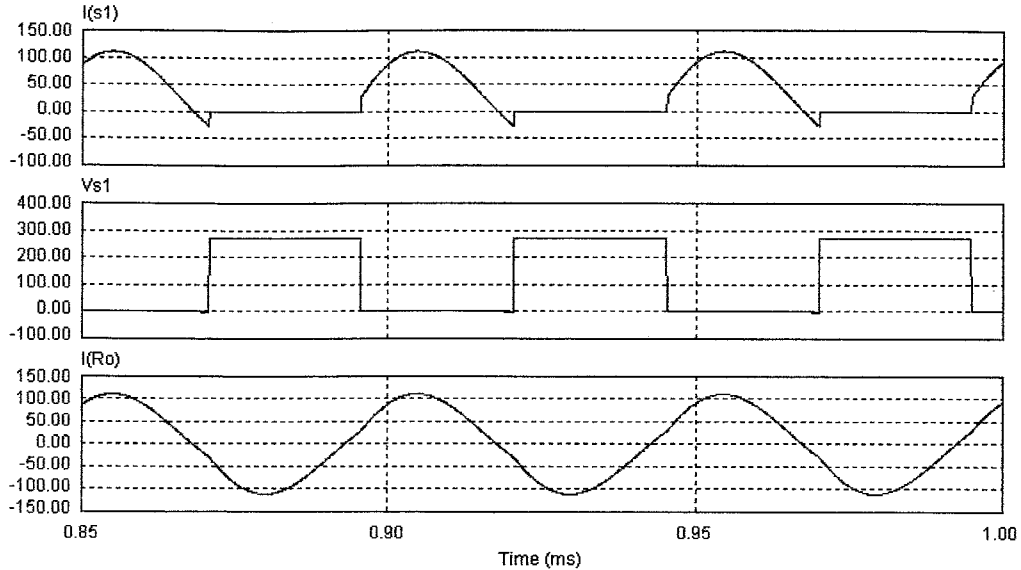
$E_d=270V, L_o=75\mu H, R_o=3\Omega, L_d=4\mu H, L_s=19\mu H, C_s=0.55\mu F, C_p=0.3\mu F, f_s=21kHz$   
 $I_{smax}=160.3A, V_{smax}=337.7V, I_{omax}=141.8A, I_{orms}=92.0A, P_o=25.4kW$

図 5.12 本論文で提案する考え方による複合共振回路

## 5.2.2 複合共振回路と直列共振回路

### 5.2.2.1 負荷抵抗 $R_o=3\Omega$ の場合

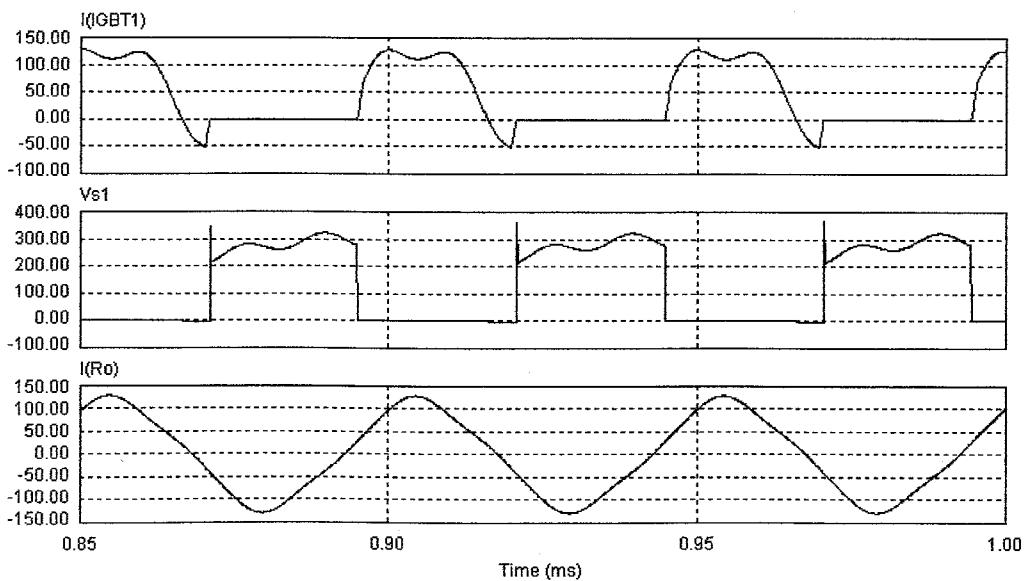
本論文の複合共振回路と直列共振回路を比較する。比較するための条件として入力電圧  $E_d=270V$ , 負荷定数 ( $L_o=75\mu H, R_o=3\Omega$ ), 動作周波数  $f_s=20.1kHz$  一定とする。この条件で比較したところ図 5.13, 5.14 のようなシミュレーション結果が得られた。



$E_d=270V, L_o=75\mu H, R_o=3\Omega, C_s=0.75\mu F, f_s=20.1kHz$

$I_{smax}=111.1A, V_{smax}=270V, I_{orms}=76.6A, P_o=17.6kW$

図 5.13 直列共振( $L_o=75\mu H, R_o=3\Omega$ )



$E_d=270V, L_o=75\mu H, R_o=3\Omega, L_s=15\mu H, C_s=0.6\mu F, C_p=0.3\mu F, f_s=20.1kHz$

$I_{smax}=128.0A, V_{smax}=322.6V, I_{orms}=84.4A, P_o=21.4kW$

図 5.14 複合共振( $L_o=75\mu H, R_o=3\Omega$ )



直列共振回路では、出力電力が **17.6kW** であるのに対して本論文の複合共振回路では、出力電力が **21.4kW** となっている。このように複合共振回路の方が約 22%増しの出力電力を出すことができる。したがって、直列共振回路と比較しても 5.2.1 節で述べた本論文の複合共振回路に対する考え方の正当性が実証された。さらに回路パラメーターに注目するとコンデンサーの大きさは、複合共振回路が  $0.9 \mu F(C_s+C_p)$ であるのに対して直列共振回路では  $0.75 \mu F$  とほぼ同じ大きさである。さらに直列共振回路にインダクタンス  $15 \mu H(L_s)$ を加えることで出力を増強することができる。このように本論文の複合共振回路は、入力電圧および負荷定数、動作周波数一定の条件下で回路パラメーターを極端に大きくすることなく出力電力を増強することができる。

### 5.2.2.2 負荷抵抗が大きい場合( $R_o=5\Omega$ )

次に負荷抵抗が大きい場合について本論文の複合共振回路と直列共振回路を比較する。通常、負荷抵抗が大きい場合、負荷部分にトランスを用いている。このトランスを用いた直列共振回路(図 5.15 参照)と本論文の複合共振回路を比較すると、図 5.16 ~5.19 のようなシミュレーション結果が得られた。なお、比較する条件として入力電圧  $E_d=270V$ , 負荷定数  $L_o=75\mu H$ ,  $R_o=5\Omega$  一定とする。

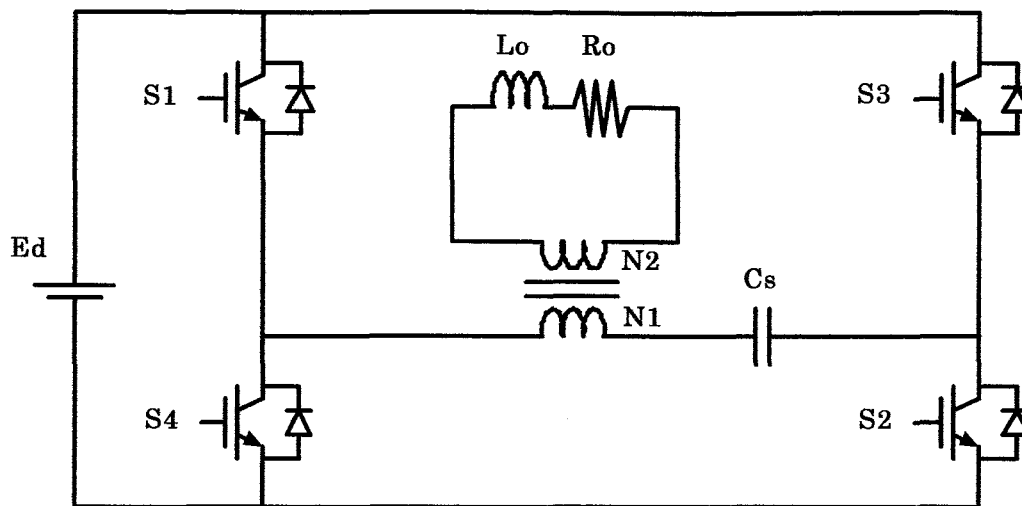
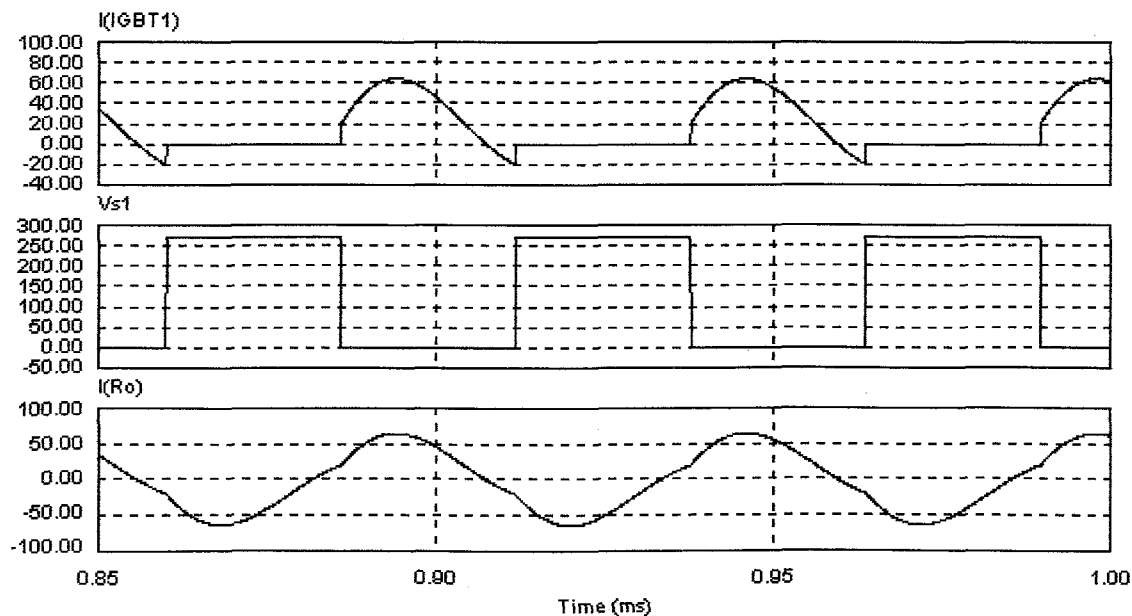


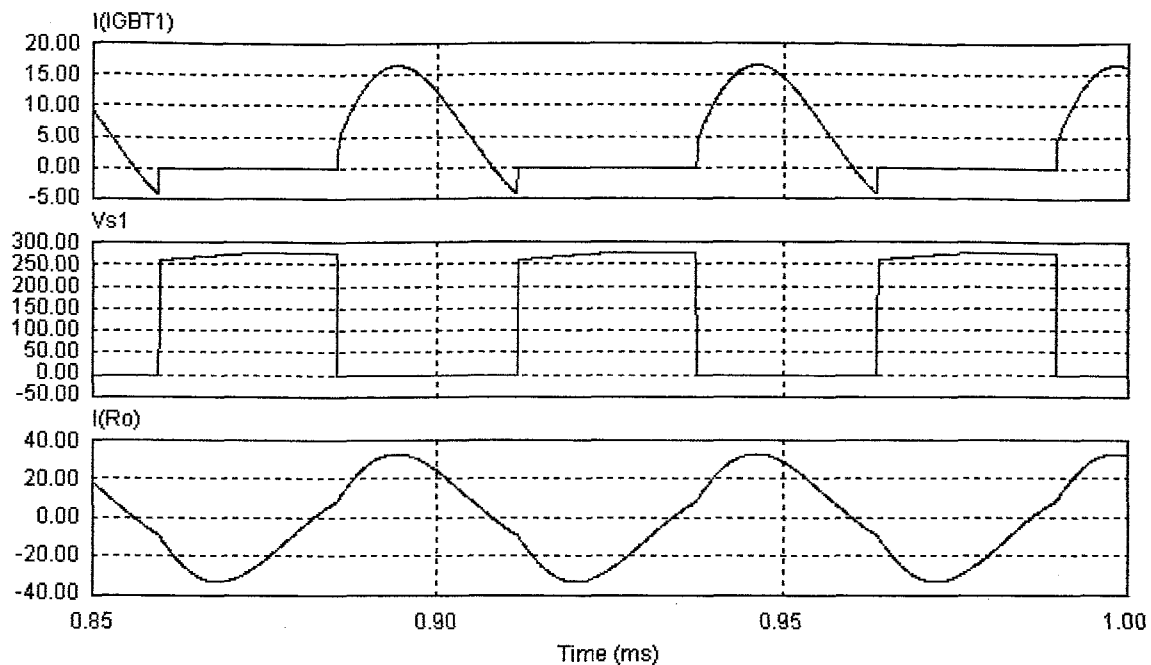
図 5.15 トランスを使用した直列共振回路



$E_d=270V, L_o=75\mu H, R_o=5\Omega, C_s=0.7\mu F, f_s=19.2kHz$

$I_{smax}=64.2A, V_{smax}=270V, I_{orms}=42.8A, P_o=9.2kW$

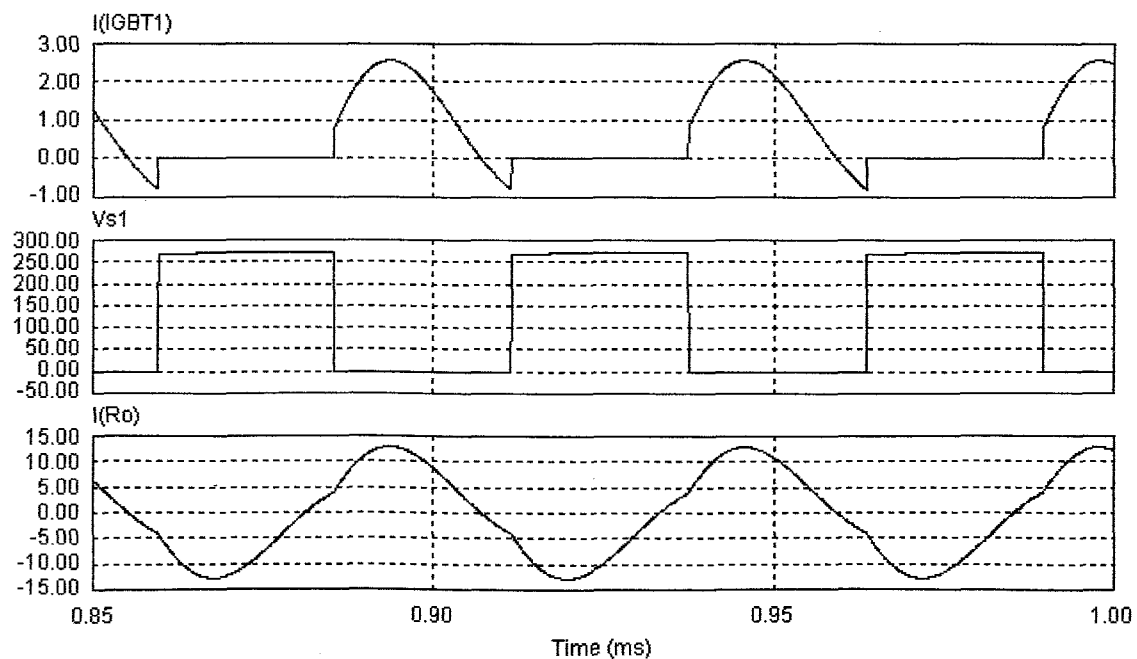
図 5.16 直列共振( $L_o=75\mu H, R_o=5\Omega$ )



$E_d=270V, L_o=75\mu H, R_o=5\Omega, C_s=0.18\mu F, f_s=19.2kHz$ , 巻き数比  $n=2$

$I_{smax}=16.5A, V_{smax}=276.4V, I_{orms}=22.1A, P_o=9.8kW$

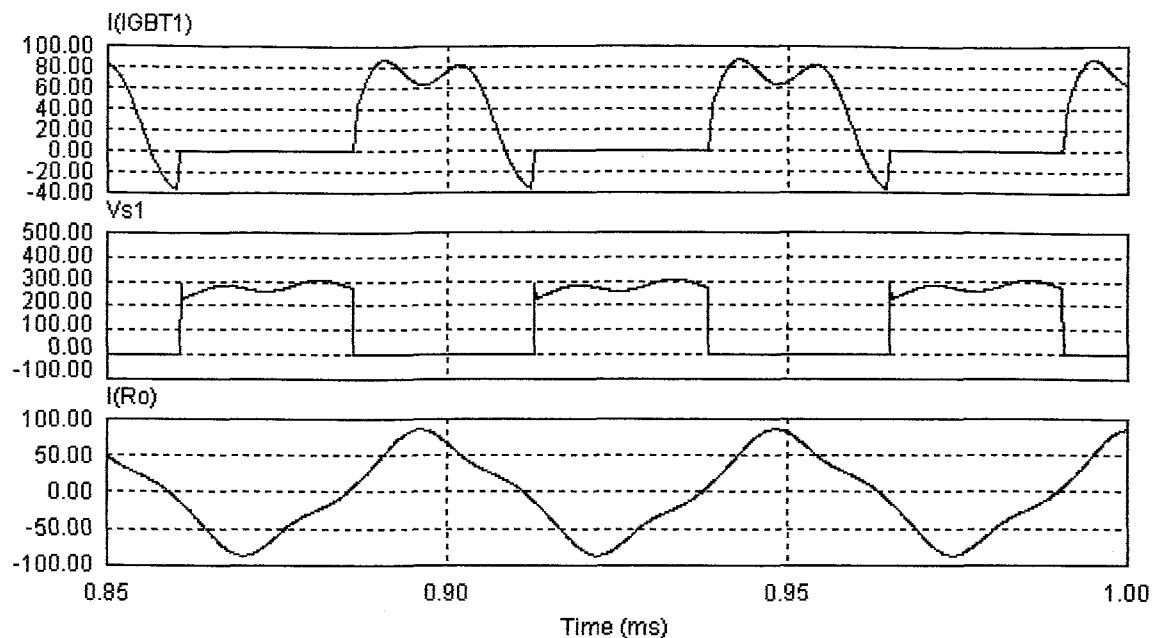
図 5.17 トランス使用直列共振(巻き数比  $n=N1/N2=2$ )



$E_d=270V, L_o=75\mu H, R_o=5\Omega, C_s=0.028\mu F, f_s=19.2kHz$ , 巻き数比  $n=5$

$I_{smax}=2.6A, V_{smax}=271.0V, I_{orms}=8.6A, P_o=9.2kW$

図 5.18 トランス使用直列共振(巻き数比  $n=N1/N2=5$ )



$E_d=270\text{V}, L_o=75\ \mu\text{H}, R_o=5\ \Omega, C_s=0.6\ \mu\text{F}, C_p=0.3\ \mu\text{F}, L_s=21\ \mu\text{H}, f_s=19.2\text{kHz}$

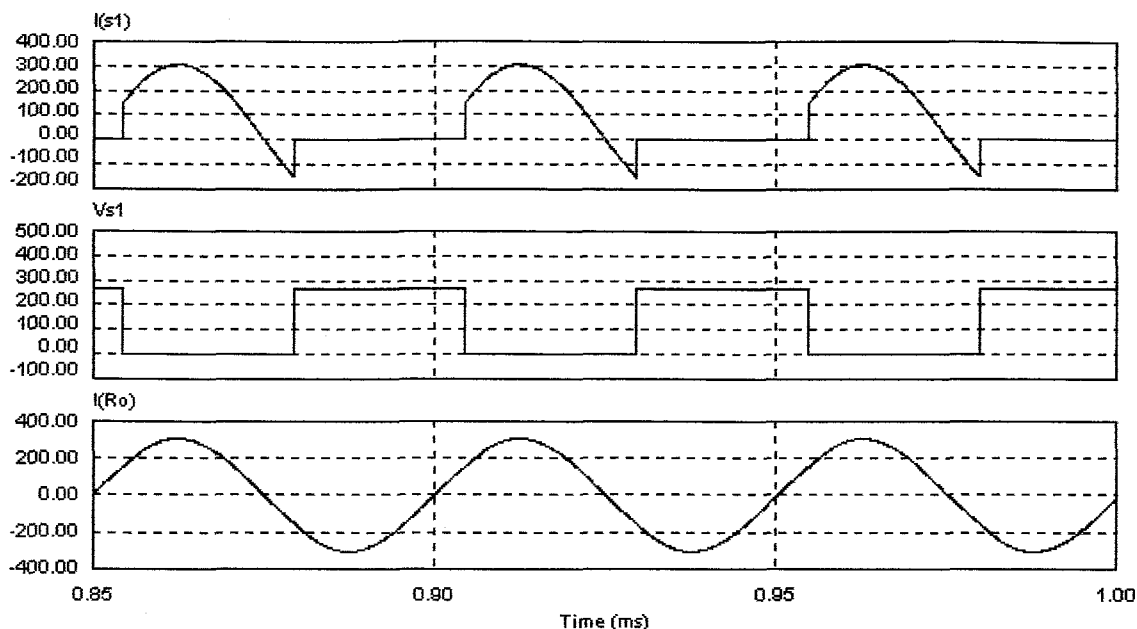
$I_{s\max}=87.1\text{A}, V_{s\max}=305.8\text{V}, I_{o\text{rms}}=53.0\text{A}, P_o=14.0\text{kW}$

図 5.19 複合共振( $L_o=75\ \mu\text{H}, R_o=5\ \Omega$ )

直列共振回路では、出力が  $9.2\sim 9.8\text{kW}$  となっている。これに対して本論文の複合共振回路では、出力が  $14.0\text{kW}$  となる。このように本論文の複合共振回路は直列共振回路と比べて約 50%増しの出力を得ることができる。したがって、負荷抵抗の大きな場合においても出力電力を十分に出すことができ、本システムの誘導加熱電源として適していると言える。

### 5.2.2.3 負荷抵抗が小さい場合( $R_o=1\ \Omega$ )

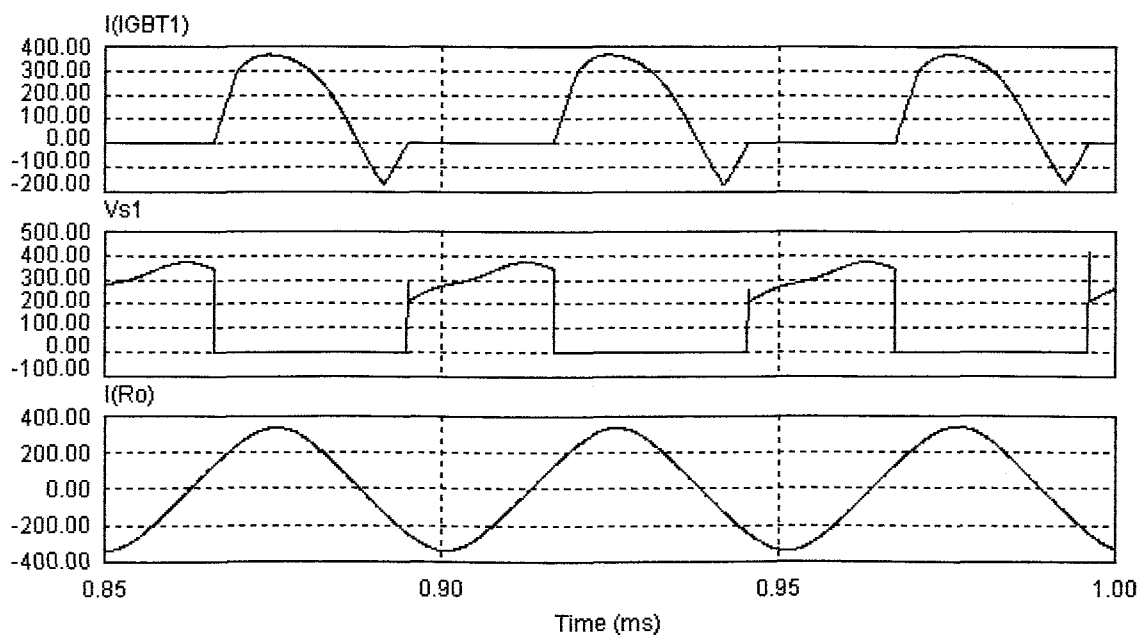
負荷抵抗が小さい場合について本論文の複合共振回路と直列共振回路を比較する。比較するための条件として入力電圧  $E_d=270\text{V}$ , 負荷定数 ( $L_o=75\ \mu\text{H}$ ,  $R_o=1\ \Omega$ ), 動作周波数  $f_s=19.9\text{kHz}$  一定とする。この条件で比較したところ図 5.20, 5.21 のようなシミュレーション結果が得られた。



$E_d=270\text{V}, L_o=75\ \mu\text{H}, R_o=1\ \Omega, C_s=0.8\ \mu\text{F}, f_s=19.9\text{kHz}$

$I_{s\max}=305.4\text{A}, V_{s\max}=270\text{V}, I_{o\text{rms}}=213.0\text{A}, P_o=45.4\text{kW}$

図 5.20 直列共振( $L_o=75\ \mu\text{H}, R_o=1\ \Omega$ )



$E_d=270\text{V}, L_o=75\ \mu\text{H}, R_o=1\ \Omega, L_s=23.7\ \mu\text{H}, C_s=0.58\ \mu\text{F}, C_p=0.27\ \mu\text{F}, f_s=19.9\text{kHz}$

$I_{s\max}=408.9\text{A}, V_{s\max}=389.4\text{V}, I_{o\text{rms}}=263.0\text{A}, P_o=69.2\text{kW}$

図 5.21 複合共振( $L_o=75\ \mu\text{H}, R_o=1\ \Omega$ )



直列共振回路では、出力が  $45.4\text{kW}$  であるのに対して本論文の複合共振回路では、 $69.2\text{kW}$  の出力となっている。このように負荷抵抗が小さい場合でも、本論文の複合共振回路は直列共振回路の約 52%増しの出力を得ることができる。また、回路パラメーターに注目するとコンデンサーの大きさは、複合共振回路が  $0.85\mu\text{F}(\text{Cs}+\text{Cp})$  であるのに対して直列共振回路は  $0.8\mu\text{F}$  とほぼ同じ大きさである。さらに直列共振回路にインダクタンス  $23.7\mu\text{H}(\text{Ls})$  を加えることで出力を増強することができる。このように本論文の複合共振回路は、回路パラメーターを極端に大きくすることなく入力電圧および負荷定数、動作周波数一定の条件下で出力を増強することができる。したがって、負荷抵抗の小さいものにおいても有効であることがわかる。

以上のシミュレーション結果より本論文の複合共振回路は、入力電圧一定の条件下で負荷抵抗がいかなる条件でも回路パラメーターを極端に大きくすることなく直列共振回路より高出力を得ることができることが分かる。また、別の視点から考えるとバッテリーなどの低電圧源を使用しても十分に出力電力を確保できると考えられ、自動車への適用も可能であると考ええる。

### 5.2.3 ソフトスタートとソフトスイッチング制御

従来の複合共振回路では、ハードスイッチングスタートが避けられなかった。そのため図 5.22 に示すように始動時にはハードスイッチングとなり過大なサージ電圧が発生し、スイッチを破壊してしまう問題があった。そこで始動時から安定動作をするソフトスタートを実現するため、図 5.23 に示すような発振回路を設けた。今回使用した C-MOS は 74112(J-K フリップフロップ), 74123(モノステーブル), 74279(S-R ラッチ), 7427(NOR), 7404(NOT), 74157(データセクタ)の 6 種類である。この発振回路は大きく 2 つに分けることができる。1 つは、回路をスタートさせる時に使用するスタート用イグナイタ部。もう 1 つは、インバータを常にソフトスイッチング動作させるためのサイクル部である。この発振回路の制御方式は複合共振回路のインダクタンス  $L_s$  に流れる電流のゼロクロス点を電流センサーで検知してスイッチのターンオン・ターンオフを行うものである。そのため回路のスタート時における過渡状態や誘導加熱時の負荷の変動に対してもその変動に追従してスイッチのオン・オフを行うことができる。したがって、常にソフトスイッチングを維持し、インバータの安定動作を実現する。また、図 5.24 に発振回路の動作波形を示す。図中の①～⑮の番号は発振回路図の番号とリンクしている。

この発振回路では、スタート用スイッチが OFF の状態にある場合、ゲート回路への信号を全て OFF とするため 74157(データセクタ)を使用している。このデータセクタの動作は、スタート用のスイッチが OFF の状態にあると 74157(データセクタ)の A の信号が 74279-3(S-R ラッチ)に出力される。これによりゲート回路への信号はすべて OFF の信号となる。また、スタート用のスイッチが ON の状態にあるとデータセクタの B の信号が 74279-3(S-R ラッチ)に出力される。

回路の始動は、図 5.23 のスタート用スイッチをオンすることにより 7427(NOR)の出力波形⑥を立ち下げ、スイッチ S1,S2 をターンオンさせて始動する(波形⑧)。そして共振現象によりインダクタンス  $L_s$  に流れる電流が正の方向からゼロクロスしたのを電流センサーで検出し、74123-4(モノステーブル)で  $L_s$  の負の電流をしばらく流す(74123-4 付属の可変抵抗で調節可能：波形⑦)。その後スイッチ S1,S2 をターンオフする(波形⑧)。したがってスイッチ S1,S2 は逆並列ダイオードを導通しているときにスイッチングするため ZCS 動作を実現する。その後、S1,S2 のパルスの立ち下がりをも 74123-2(モノステーブル)で検知して、デッドタイムを作り出す(74123-2 付属の可変抵抗で調節可能：波形⑨)。そして 74123-3, 74279-2, 7404-1 を用いて⑬の波形を作る。この波形⑬と⑭を 74279-3(S-R ラッチ)に入力してスイッチ S3,S4 のパルスを作り出す(波形⑮)。その後、S1,S2 のときと同様に動作する。

従来の始動時におけるハードスイッチングのシミュレーション波形(図 5.22)と上述の発振回路を使用した本論文の複合共振回路の始動時における実験波形(図 5.25)を比較すると始動時のハードスイッチングによるサージ電圧が抑制され、ソフトスタートによる安定動作をしていることが分かる。

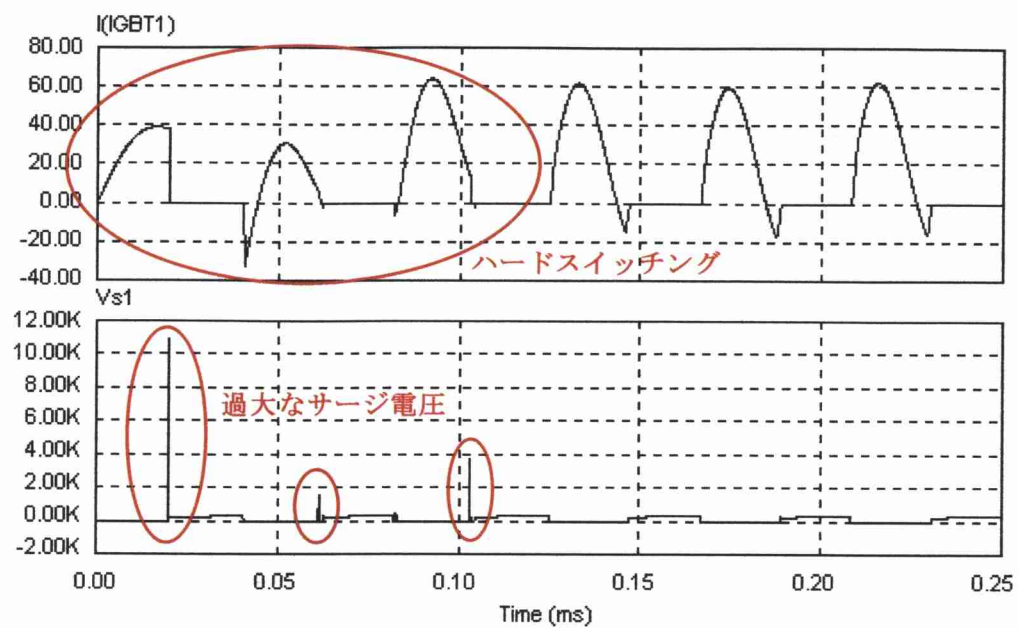


図 5.22 ハードスイッチングスタート時の波形

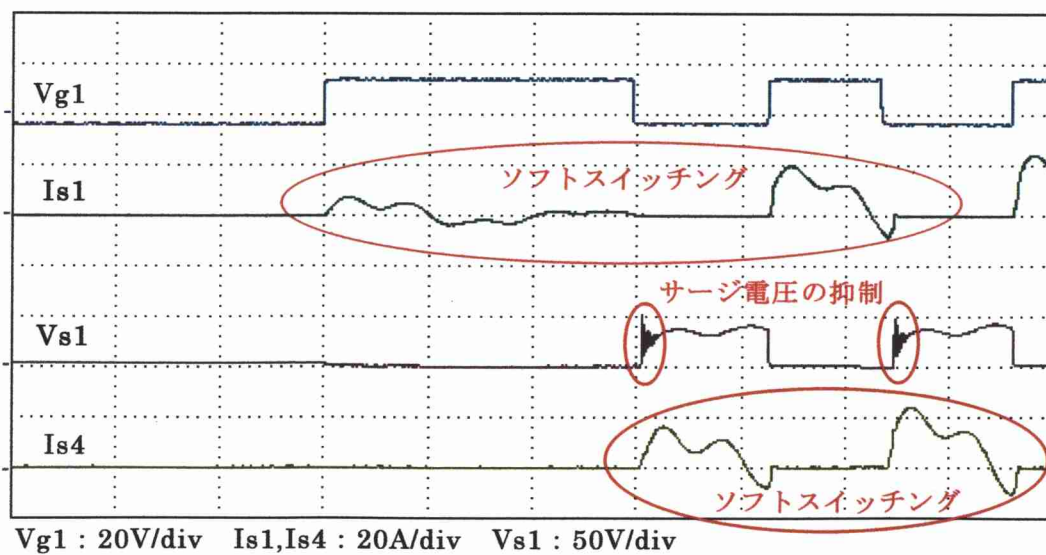


図 5.25 ソフトスタート時の波形

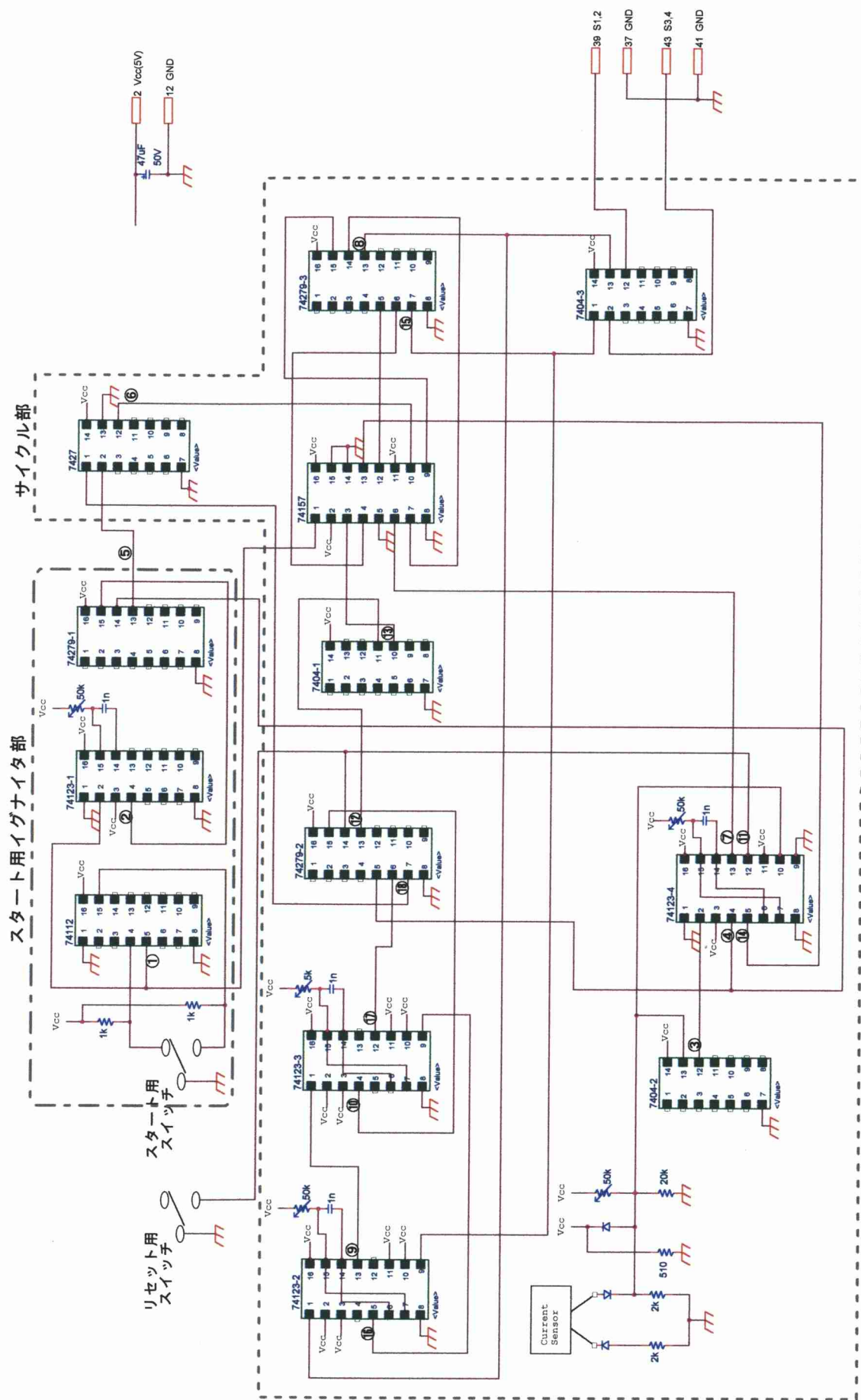


図 5.23 ソフトスタートとソフトスイッチング用発振回路

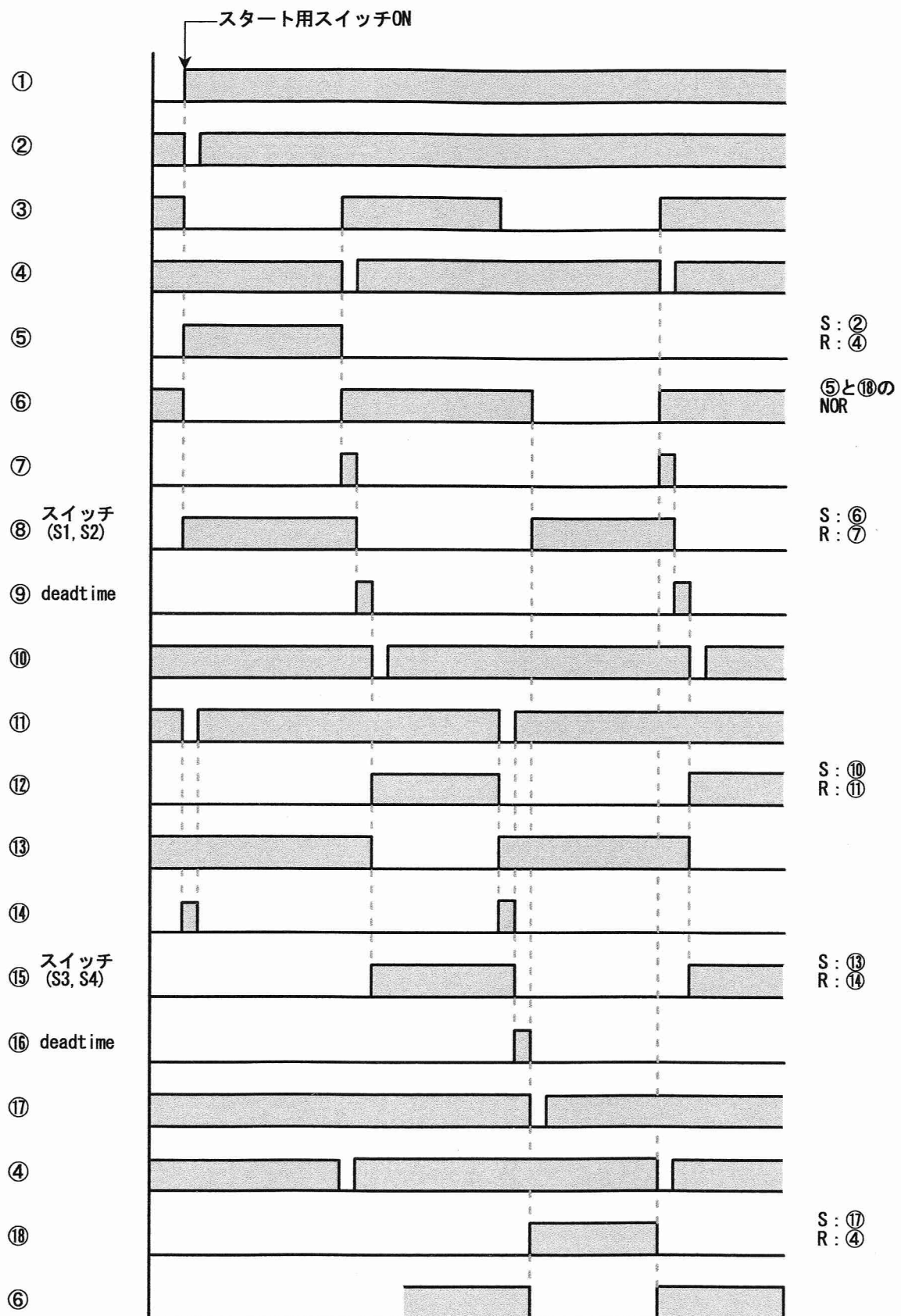


図 5.24 発振回路の動作波形



次にこの発振回路の性能実験として、負荷を変動させた実験を行った。負荷の変動は、ワーキングコイルを巻いたフランジの中に磁性体である鉄の塊を入れ、この鉄の塊を徐々に抜いていくことにより変動させた。図 5.26～5.29 に本論文の複合共振回路を使用した負荷変動時のスイッチ電流波形とスイッチ電圧波形を示す。回路パラメーターは  $L_s=17.9\mu\text{H}$ ,  $C_s=0.52\mu\text{F}$ ,  $C_p=0.312\mu\text{F}$ ,  $L_d=4\mu\text{H}$  で、入力電圧 40V 一定とした。図 5.26 は  $L_o=91.0\mu\text{H}$ ,  $R_o=2.25\Omega$  時のスイッチ電流・スイッチ電圧波形である。この時の動作周波数は 18.88kHz で電力変換効率は 96.7%となっている。図 5.27 は  $L_o=92.4\mu\text{H}$ ,  $R_o=1.6\Omega$  時のスイッチ電流・スイッチ電圧波形である。この時の動作周波数は 19.17kHz で電力変換効率は 95.8%となっている。図 5.28 は  $L_o=93.5\mu\text{H}$ ,  $R_o=0.95\Omega$  時のスイッチ電流・スイッチ電圧波形である。この時の動作周波数は 19.47kHz で電力変換効率は 94.3%となっている。図 5.29 は  $L_o=94.5\mu\text{H}$ ,  $R_o=0.43\Omega$  時のスイッチ電流・スイッチ電圧波形である。この時の動作周波数は 19.86kHz で電力変換効率は 90.7%となっている。このように負荷が変動することによって最適な動作領域を外れ、電力変換効率は 96.7%から 90.7%まで低下している。しかし、負荷の変動においても ZCS 動作を維持し、インバータの安定動作を実現していることが確認できる。この実験より本論文の発振回路が負荷の変動に対応してスイッチングパルスを制御し、ソフトスイッチングを維持していることが分かり、理論の正当性が実証された。

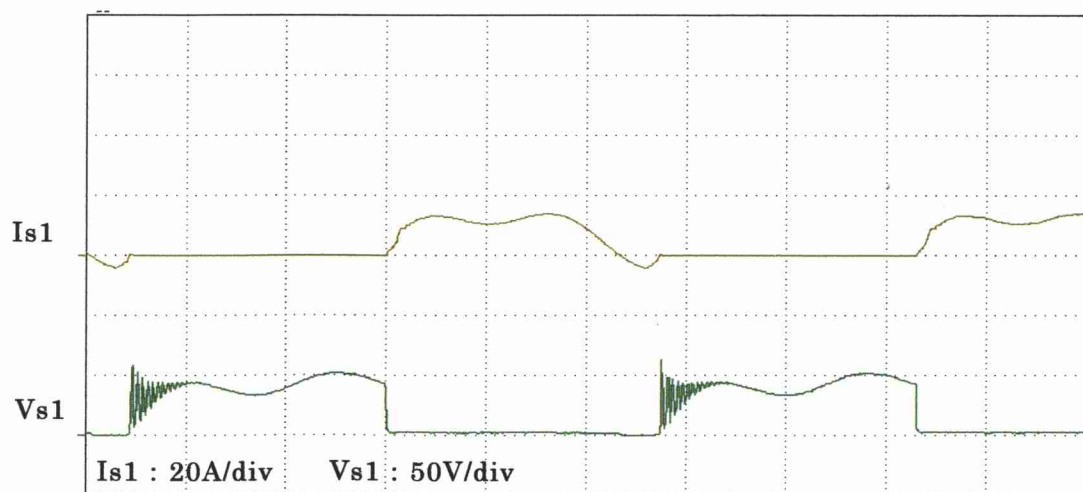


図 5.26 負荷定数  $L_o=91.0\mu\text{H}$ ,  $R_o=2.25\Omega$  時の波形

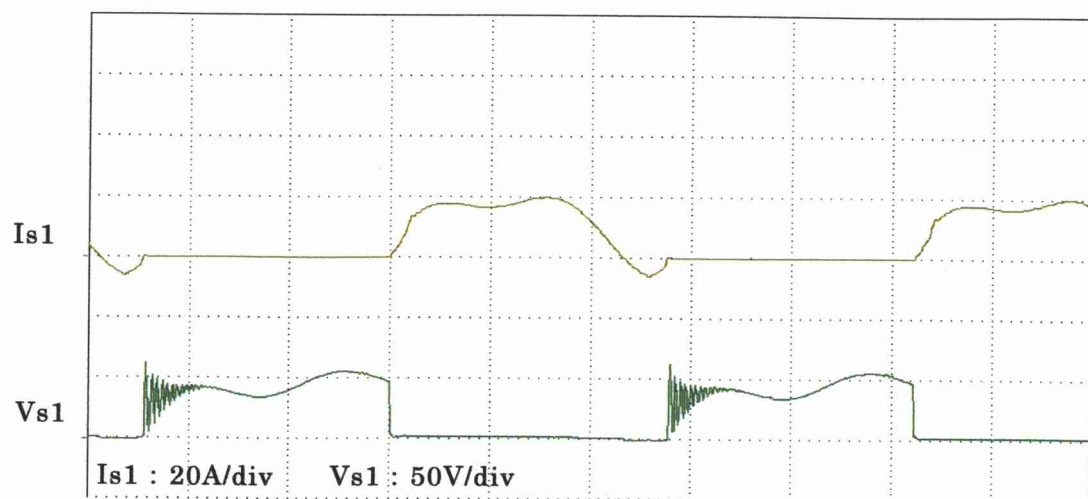


図 5.27 負荷定数  $L_o=92.4\mu\text{H}$ ,  $R_o=1.6\Omega$  時の波形

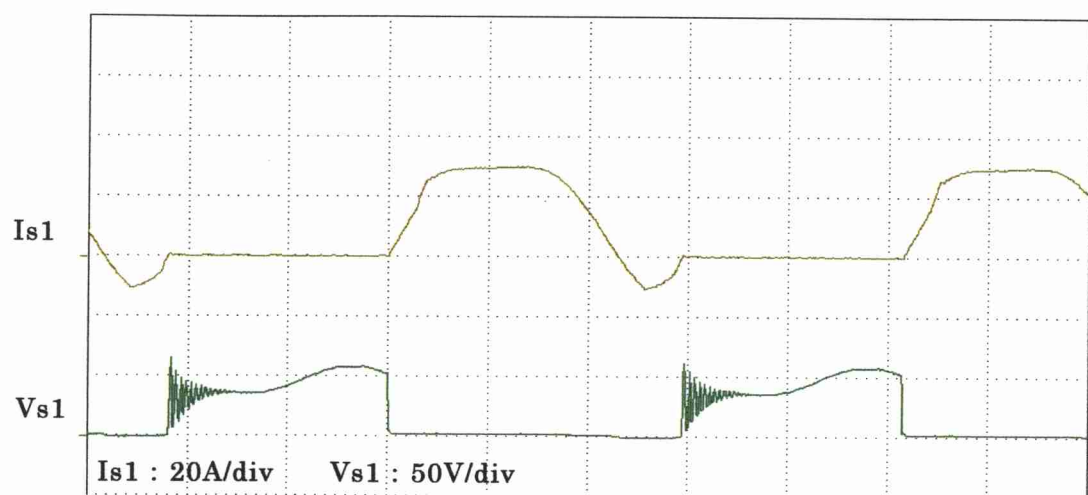


図 5.28 負荷定数  $L_o=93.5\mu\text{H}$ ,  $R_o=0.95\Omega$  時の波形

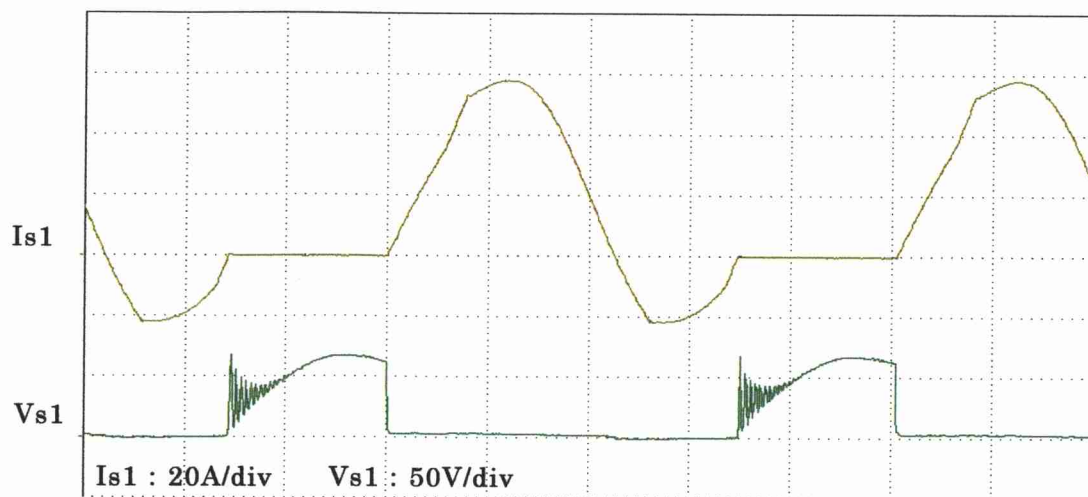


図 5.29 負荷定数  $L_o=94.5\mu\text{H}$ ,  $R_o=0.43\Omega$  時の波形

## 5.3 回路設計

### 5.3.1 回路パラメーターの選定

次に本論文の複合共振回路における回路パラメーターの選定方法について検討する。インピーダンスに関する関係式(1)および動作周波数である 1 次側(Ls・Lo・Ro・Cs)の共振周波数を表す式(2)、3 次側(Ls・Cp)の共振周波数を表す式(3)の 3 つの式による連立方程式から回路パラメーターLs,Cs,Cp を導き出す。その計算過程を下に示す。上述の連立方程式による回路パラメーターの選定方法において、初期値として負荷定数(Lo,Ro),インピーダンス比 p,動作周波数 f<sub>1</sub>を与える必要がある。ここでインピーダンス比 p とは、式(1)に示すように“3 次側のインピーダンス”と“1 次側のインピーダンス”の比で定義する。また、負荷定数は誘導加熱ユニットであるワーキングコイルと金属フィルタによって決まる。さらに、動作周波数は、設計者側が自由に与えることができる。しかし、インピーダンス比 p の値によって設定した動作周波数である 1 次側の共振周波数(f<sub>1</sub>)で動作するか、3 次側の共振周波数(f<sub>3</sub>)で動作するかが決まる。そこで、次節においてインピーダンス比 p による影響を解析する。

#### 回路パラメーターの選定方法

インピーダンスに関して

$$p = \frac{\text{3次側のインピーダンス}}{\text{1次側のインピーダンス}} = \frac{\omega_1 \cdot Ls - \frac{1}{\omega_1 \cdot Cp}}{\sqrt{R^2 + \left\{ \omega_1 (Ls + Lo) - \frac{1}{\omega_1 \cdot Cs} \right\}^2}} \quad \dots (1)$$

動作周波数(f<sub>1</sub> : 1 次側の共振周波数)

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(Ls + Lo)Cs} - \frac{R^2}{4(Ls + Lo)^2}} \quad \dots (2)$$

3 次側の共振周波数倍(f<sub>3</sub>)

$$f_3 = \frac{1}{2\pi \sqrt{Ls \cdot Cp}} \quad \dots (3)$$

式(3)より Cp を求めると

$$Cp = \frac{1}{4\pi^2 \cdot Ls \cdot f_3^2} \quad \dots (4)$$

これを式(1)に代入すると

$$p\sqrt{R^2 + \left\{ \omega_1(Ls + Lo) - \frac{1}{\omega_1 \cdot Cs} \right\}^2} = \omega_1 \cdot Ls - \frac{4\pi^2 \cdot Ls \cdot f_3^2}{\omega_1} \quad \dots (1)'$$

式(1)'と(2)の連立方程式を解くと(変数を Ls, Cs とする)

式(2)より

$$Cs = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (Ls + Lo) \left\{ f_1^2 + \frac{R^2}{4^2 \cdot \pi^2 (Ls + Lo)^2} \right\}} \quad \dots (5)$$

この Cs を式(1)'に代入すると

$$(-4^2 \cdot X_3)Ls^4 - (2^5 \cdot Lo \cdot X_3)Ls^3 + (Y - 4^2 \cdot Lo^2 \cdot X_3)Ls^2 + (2Lo \cdot Y)Ls + Y \cdot Lo^2 + p^2 \cdot R^4 = 0 \quad \dots (6)$$

と Ls の 4 次方程式が導き出される。

なお、ここで

$$X_3 = (\omega_1^2 - 4\pi^2 \cdot f_3^2)^2$$

$$Y = 4^2 \cdot p^2 \cdot \omega_1^2 \cdot R^2$$

と置く。

次に式(6)の Ls の 4 次方程式を

$$Ls^4 + A \cdot Ls^3 + B \cdot Ls^2 + C \cdot Ls + D = 0 \quad \dots (7)$$

となるように A, B, C, D を置き換えると

$$A = 2Lo$$

$$B = \frac{4^2 \cdot Lo^2 \cdot X_3 - Y}{4^2 \cdot X_3}$$

$$C = -\frac{Lo \cdot Y}{8X_3}$$

$$D = -\frac{Y \cdot Lo^2 + p^2 \cdot R^4}{4^2 \cdot X_3}$$

となる。

ここで式(7)の4次方程式を解いていく。

まず式(7)を次のように変形する。

$$(Ls^2 + \frac{1}{2}Ls + \lambda)^2 - \left\{ (\frac{1}{4}A^2 + 2\lambda - B) \cdot Ls^2 + (A \cdot \lambda - C) \cdot Ls + \lambda^2 - D \right\} = 0$$

この式は、展開すると $\lambda$ が消え、式(7)と等しくなる。そのため $\lambda$ は任意の値で良い。

そこで

$$(A \cdot \lambda - C)^2 = (\lambda^2 - D)(A^2 + 8\lambda - 4B) \quad \dots (8)$$

を満たす $\lambda$ を選ぶことにする。この式は $\lambda$ の3次方程式になっているため、3次方程式の解の公式で解くことができる。

そこで式(8)を次のように変形する。

$$\lambda^3 + A_3 \cdot \lambda^2 + B_3 \cdot \lambda + C = 0 \quad \dots (9)$$

ただし

$$A_3 = -\frac{1}{2}B$$

$$B_3 = \frac{1}{4}(A \cdot C - 4D)$$

$$C_3 = \frac{1}{2}(B \cdot D - \frac{1}{4} \cdot A^2 \cdot D - \frac{1}{4} \cdot C^2) \quad \text{とする。}$$

ここで式(9)を3次方程式の解の公式により解くと

$$\lambda = S^n \cdot \sqrt[3]{-\frac{1}{2}T + \sqrt{\frac{1}{4}T^2 + \frac{1}{27}U}} + S^{3-n} \cdot \sqrt[3]{-\frac{1}{2}T - \sqrt{\frac{1}{4}T^2 + \frac{1}{27}U}} - \frac{1}{3}A_3$$

ただし

$$S = \frac{-1 + \sqrt{3}i}{2}$$

$$T = \frac{2}{27}A_3^3 - \frac{1}{3}A_3 \cdot B_3 + C_3$$

$$U = (B_3 - \frac{1}{3}A_3^2)^3$$

$$n = 0 \sim 2$$

以上より式(7)の  $Ls$  の 4 次方程式は

$$\begin{cases} Ls^2 + (\frac{1}{2}A - \alpha) \cdot Ls + \lambda - \beta = 0 \\ Ls^2 + (\frac{1}{2}A + \alpha) \cdot Ls + \lambda + \beta = 0 \end{cases}$$

の 2 つの 2 次方程式と同じことになる。

ただし

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{\frac{1}{4}A^2 + 2\lambda - B} \\ \beta = \sqrt{\lambda^2 - D} \end{cases} \quad \text{とする。}$$

したがって、式(7)の  $Ls$  の 4 次方程式の解は

$$\begin{cases} Ls = \frac{(\alpha - \frac{1}{2}A) \pm \sqrt{(\frac{1}{2}A - \alpha)^2 - 4(\lambda - \beta)}}{2} \\ Ls = \frac{-(\alpha + \frac{1}{2}A) \pm \sqrt{(\frac{1}{2}A + \alpha)^2 - 4(\lambda + \beta)}}{2} \end{cases} \quad \text{となる。}$$

よって、 $Ls$  に関して 4 つの解が導き出せる。しかし、この 4 つの解のうち実数解となるのは 1 つのみであり、残りの 3 つは虚数解となる。(ただし、重解のときを除く)したがって、回路パラメーターとして使用できるのは実数解のみであるから自動的に 1 組の回路パラメーターに絞り込むことができる。



### 5.3.2 インピーダンス比 $p$ による影響

インピーダンス比  $p$  の値によって動作周波数が、1 次側の共振周波数( $f_1 : L_s \cdot L_o \cdot R_o \cdot C_s$  で決まる共振周波数)となるか 3 次側の共振周波数( $f_3 : L_s \cdot C_p$  で決まる共振周波数)になるかが決まる。その動作周波数が急変するインピーダンス比の値(以後、境界線または境界点という)を、負荷定数および設定動作周波数を変えて解析する。その結果、図 5.30～5.34 に示すように動作周波数が急変する境界線は、負荷定数が一定であれば設定周波数にほとんど依存しないことが分かる。これらの図において境界線よりインピーダンス比  $p$  の値が低い領域では 3 次側の共振周波数での動作となり、境界線より  $p$  の値が高い領域では 1 次側の共振周波数での動作となる(図 5.35 参照)。例えば図 5.35 の場合、図中の■のポイントでは図 5.36 に示すように動作周波数が約 54kHz となる。また、図中の▲のポイントでは図 5.37 に示すように動作周波数が約 19kHz となり設定周波数付近での動作となる。すなわち、5.2 節で述べた新しいコンセプトによる複合共振回路の考え方では、1 次側の共振周波数で動作させる必要がある。したがって、 $p$  の値が境界線より高い領域でインバータを動作させることになる。

次に最適な動作をする  $p$  の値について検討する。ここで有効出力電力( $P_o$ )とスイッチ電流最大値( $I_{smax}$ )の比  $P_o / I_{smax}$  で表されるパラメーターを用いる。図 5.38～5.40 に各  $P_o / I_{smax}$  の値におけるスイッチ電流、スイッチ電圧、出力電流の波形を比較する。これらの図から分かるように  $P_o / I_{smax}$  で表されるパラメーターが大きいとスイッチ電流の波形が台形波に近くなり、逆に  $P_o / I_{smax}$  の値が小さいとスイッチ電流の波形の窪みが深くなる。したがって、 $P_o / I_{smax}$  の値が大きいほど一周期を通して平均的にスイッチ電流を流すことになり、スイッチ電流に関するスイッチング素子動作責務が緩やかとなる。また、 $P_o / I_{smax}$  が小さいと一周期における電流の変化が激しくなるためスイッチ電流最大値が大きくなってしまふ。したがって、同じ出力を出すには  $P_o / I_{smax}$  の値が小さいときよりも大きいときの方がスイッチ電流最大値を抑制することができる。以上より、出力電力  $P_o$  を大きくし、かつ  $I_{smax}$  を抑制するには、 $P_o / I_{smax}$  の値が大きくなるパラメーターを選定する必要がある。

次に、負荷定数をパラメーターとして  $P_o / I_{smax}$  の値の変化を解析する。図 5.41～5.49 に負荷定数  $L_o$  を 55,75,95  $\mu H$ 、そして負荷定数  $R_o$  を 1,3,5  $\Omega$  と変化させた場合のスイッチ電流、スイッチ電圧、出力電流波形を示す。これらの図から負荷抵抗  $R_o$  を一定として考えると負荷インダクタンス  $L_o$  が大きいほどスイッチ電流波形の窪みは小さくなり、それに伴って  $P_o / I_{smax}$  の値も大きくなっていることが分かる。しかし、負荷インダクタンスを一定として考えると、負荷抵抗  $R_o$  の大きさと  $P_o / I_{smax}$  の値の間には特に相関関係はない。したがって、負荷を製作する際、負荷インダクタンスが大きくなるようにした方が出力電力に対してスイッチ電流最大値を抑制することができる。

以上のことを踏まえて実際の負荷( $L_o=86.8 \mu H, R_o=0.73 \Omega$ )において回路設計を行う。設定周波数を 22kHz とすると図 5.33 と実際の負荷定数から動作周波数の境界点は、およそインピーダンス比  $p=23$  と読みとれる。よって、 $p=23$  より大きな領域でインバータを動作させる必要がある。ここで  $p$  について 23～30 までの  $P_o / I_{smax}$  をシミュレーションより求めると表 5.1 のようになる。

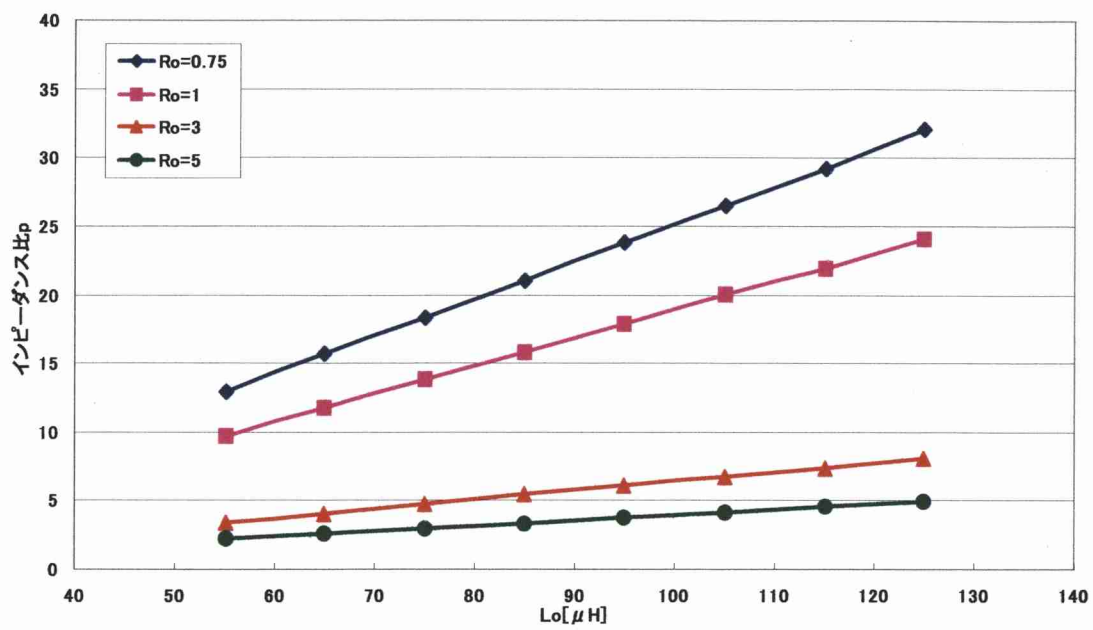


図 5.30 周波数 19kHz 時の動作周波数の境界線

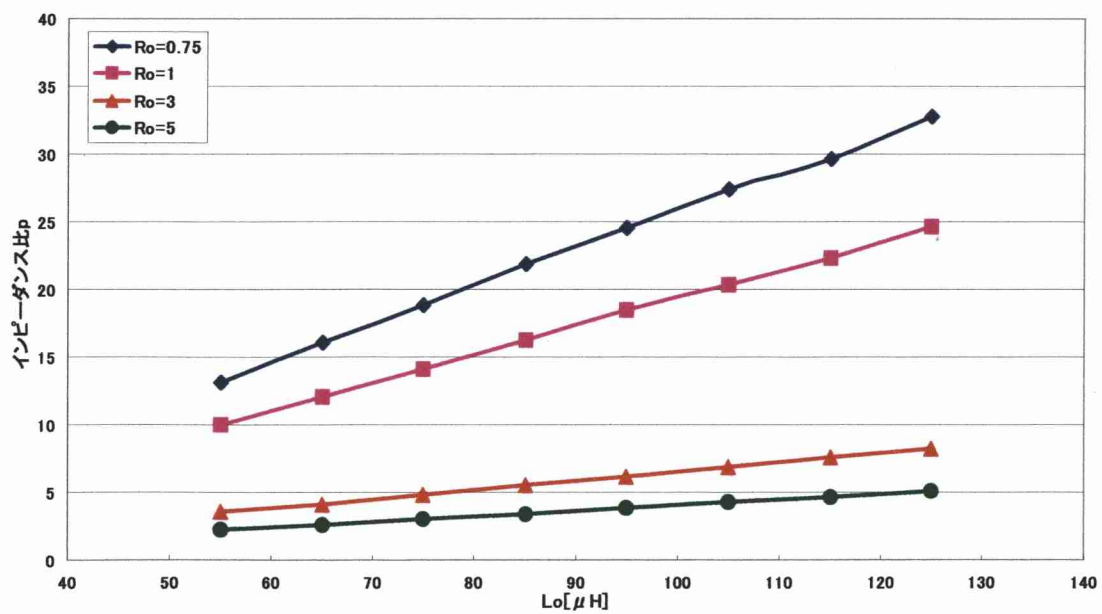


図 5.31 周波数 20kHz 時の動作周波数の境界線

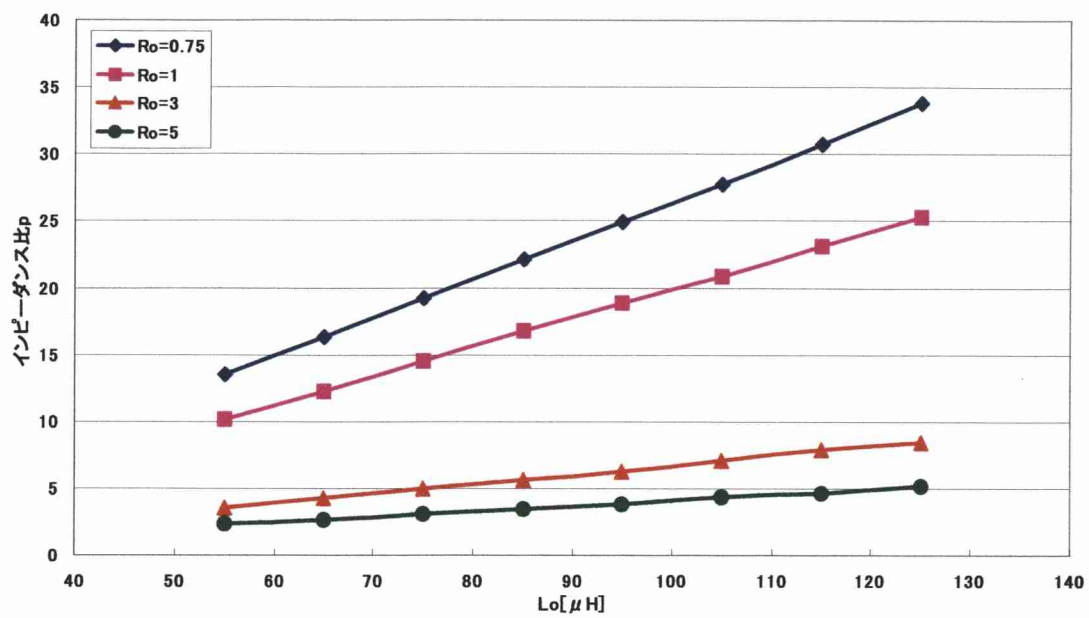


図 5.32 周波数 21kHz 時の動作周波数の境界線

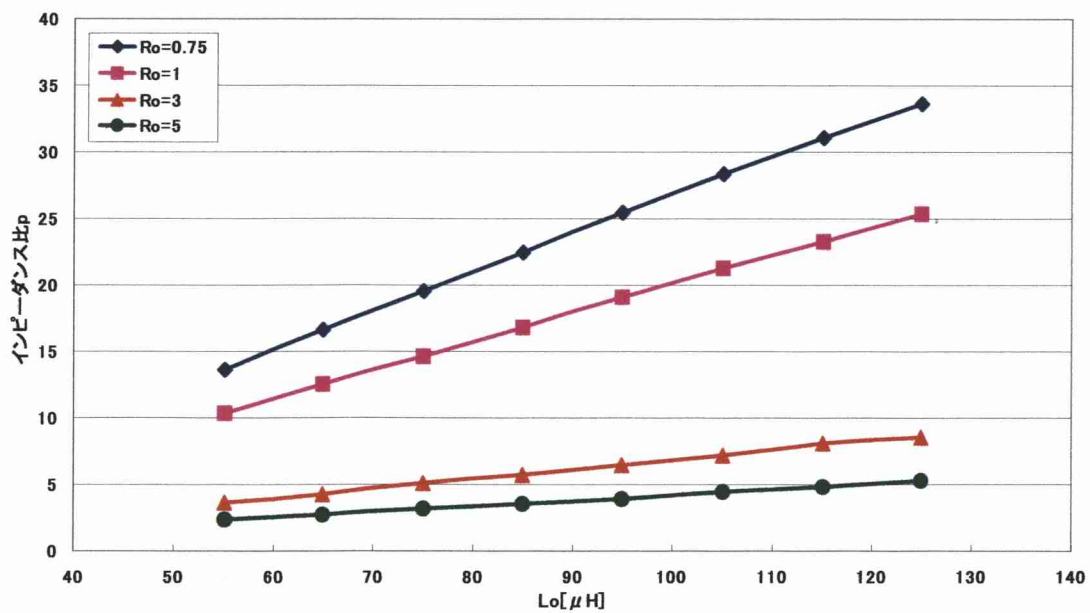


図 5.33 周波数 22kHz 時の動作周波数の境界線

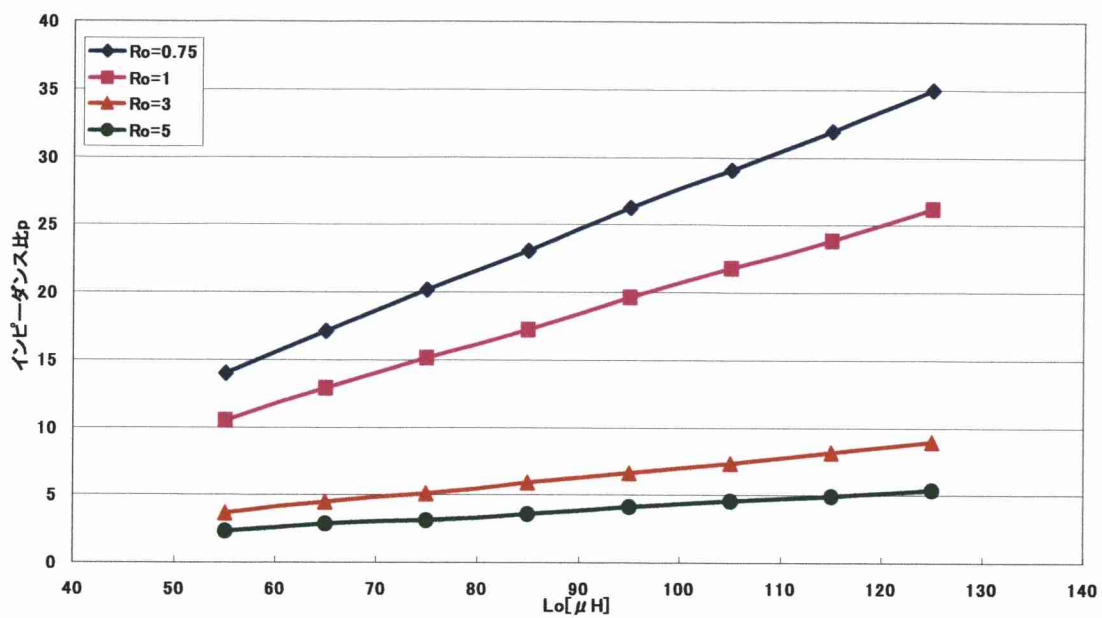


図 5.34 周波数 25kHz 時の動作周波数の境界線

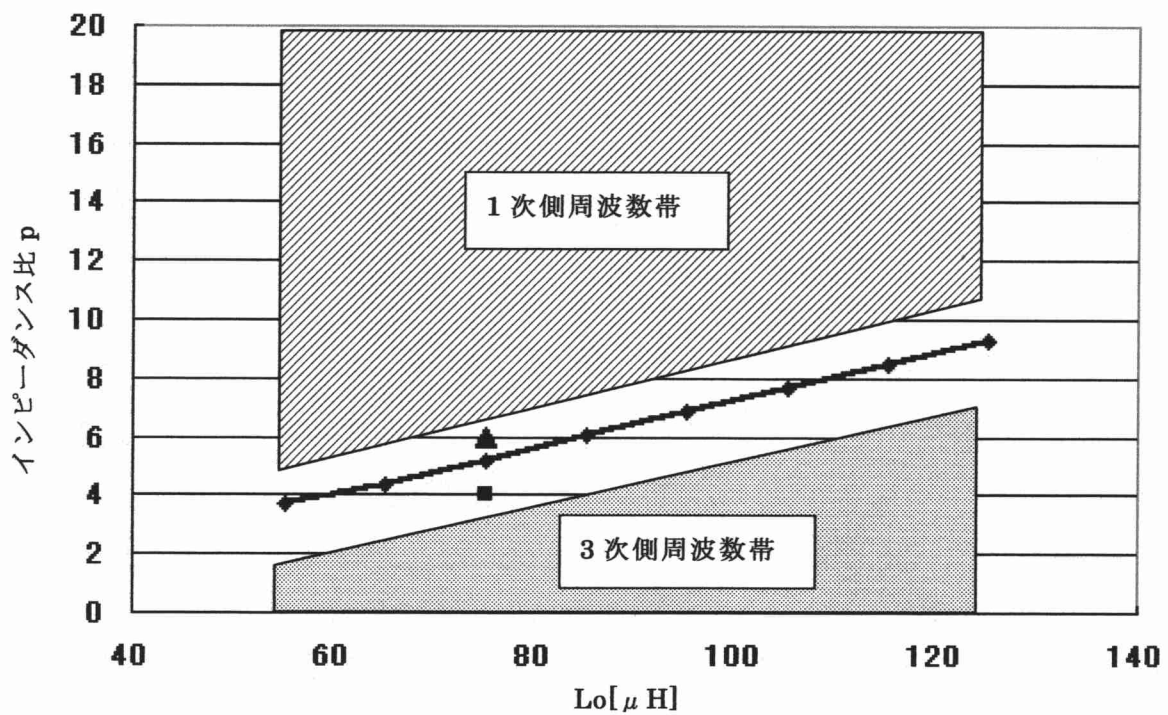


図 5.35 動作周波数の変化

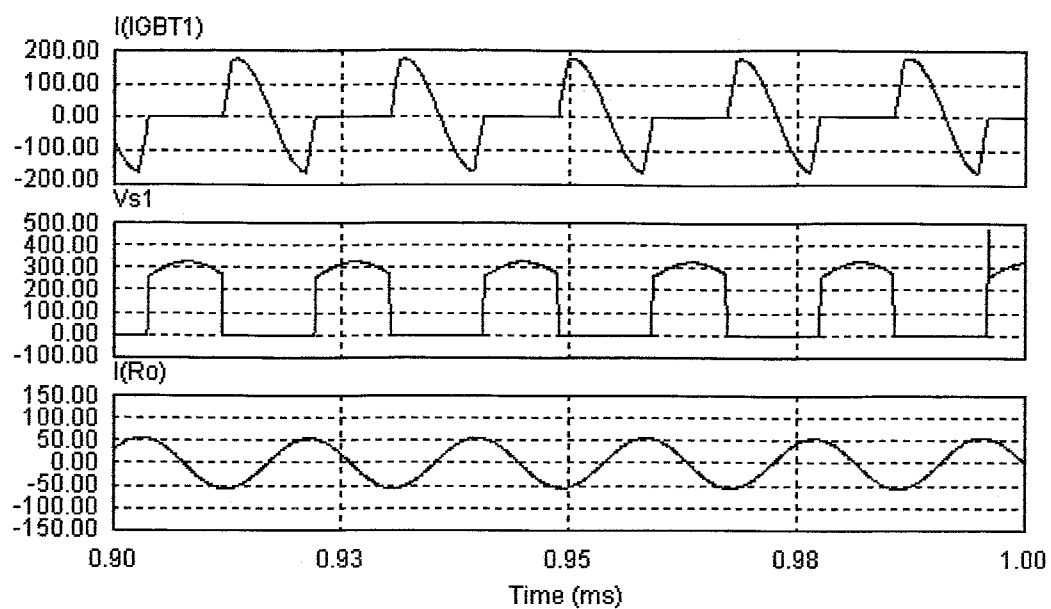


図 5.36 3 次側周波数(54kHz)での動作波形

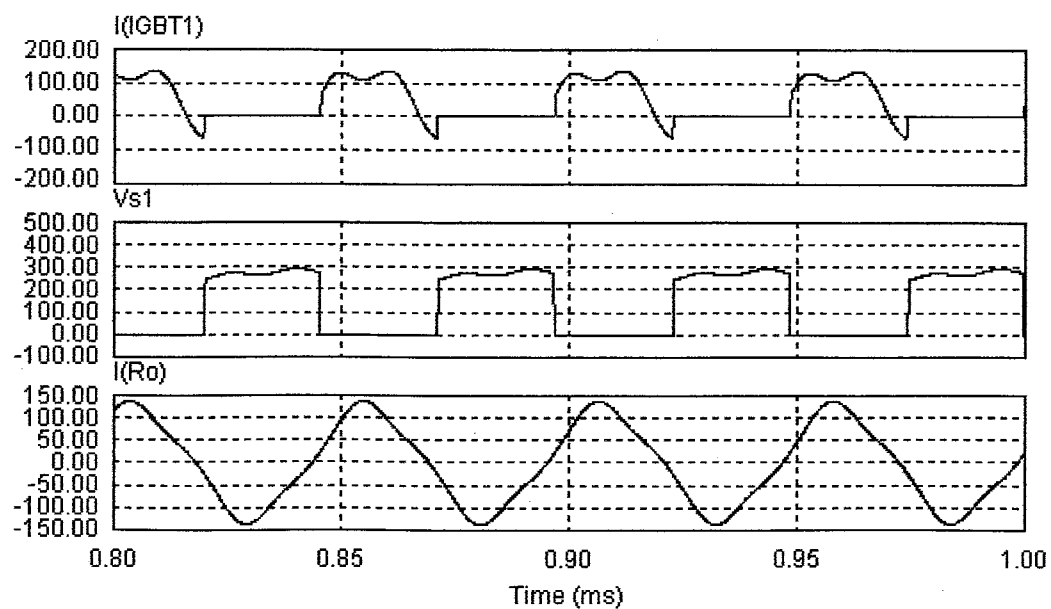
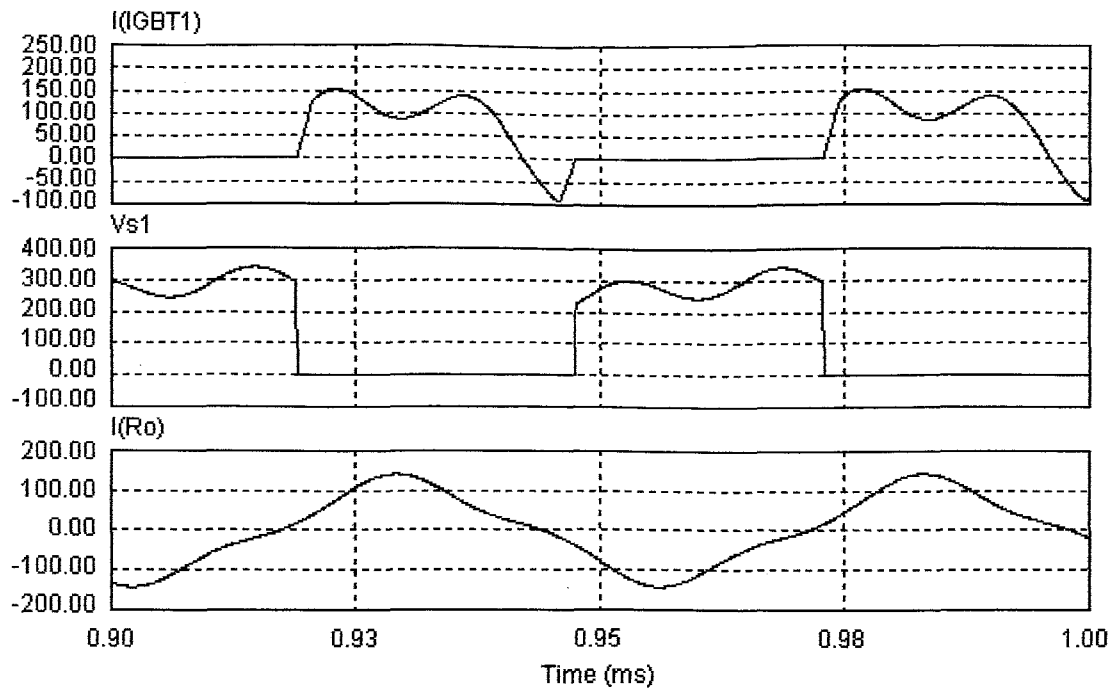


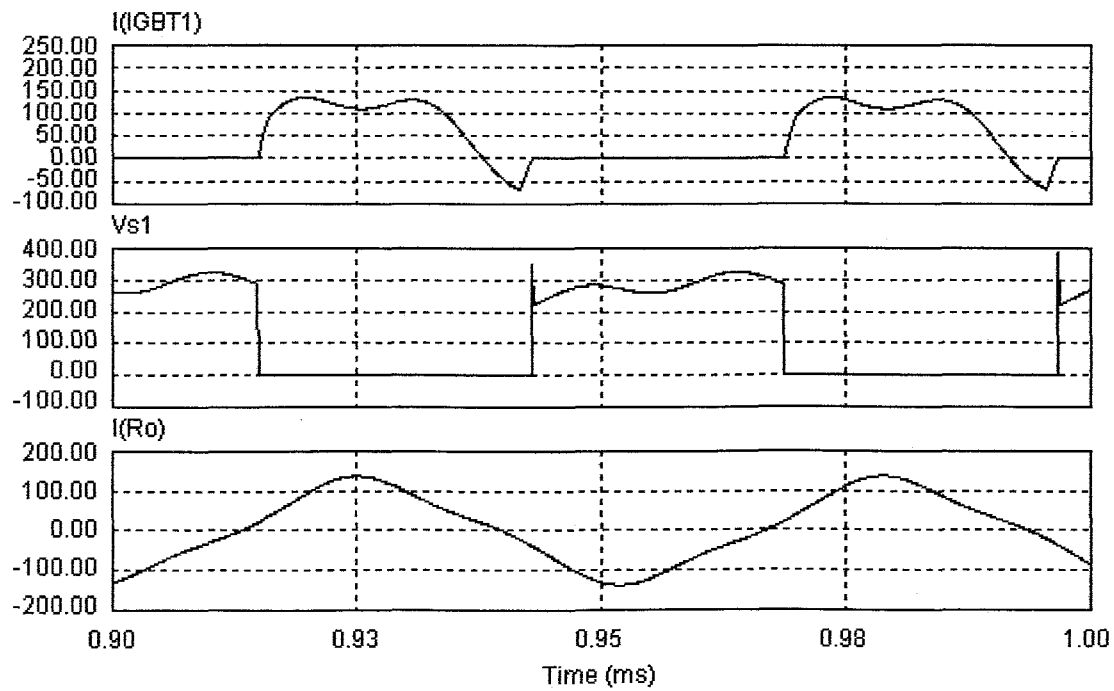
図 5.37 1 次側周波数(19kHz)での動作波形



$L_o=75\ \mu\text{H}$ ,  $R_o=3\ \Omega$ ,  $L_s=16\ \mu\text{H}$ ,  $C_s=0.68\ \mu\text{F}$ ,  $C_p=0.44\ \mu\text{F}$

$I_{s\max}=153.7\text{A}$ ,  $V_{s\max}=340.6\text{V}$ ,  $I_{\text{orms}}=86.8\text{A}$

図 5.38  $P_o/I_{s\max}=147.0$  の時の波形

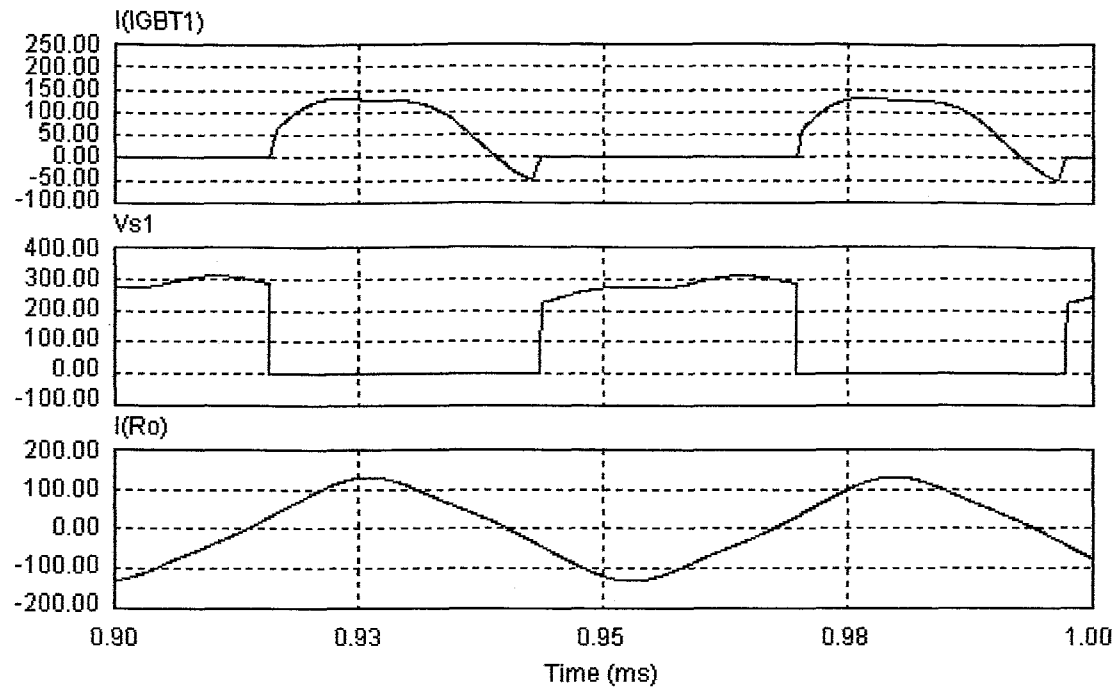


$L_o=75\ \mu\text{H}$ ,  $R_o=3\ \Omega$ ,  $L_s=19.4\ \mu\text{H}$ ,  $C_s=0.66\ \mu\text{F}$ ,  $C_p=0.36\ \mu\text{F}$

$I_{s\max}=156.4\text{A}$ ,  $V_{s\max}=324.4\text{V}$ ,  $I_{\text{orms}}=92.0\text{A}$

図 5.39  $P_o/I_{s\max}=162.4$  の時の波形

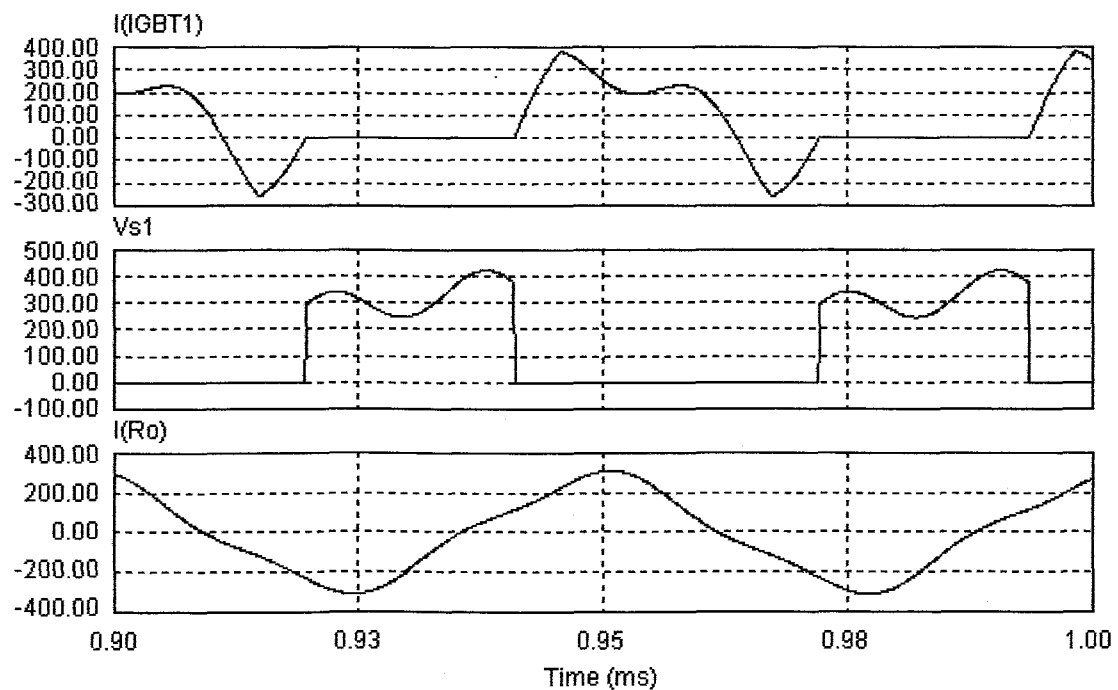




$L_o=75 \mu H, R_o=3 \Omega, L_s=29.2 \mu H, C_s=0.6 \mu F, C_p=0.24 \mu F$

$I_{smax}=140.2A, V_{smax}=311.3V, I_{orms}=90.4A$

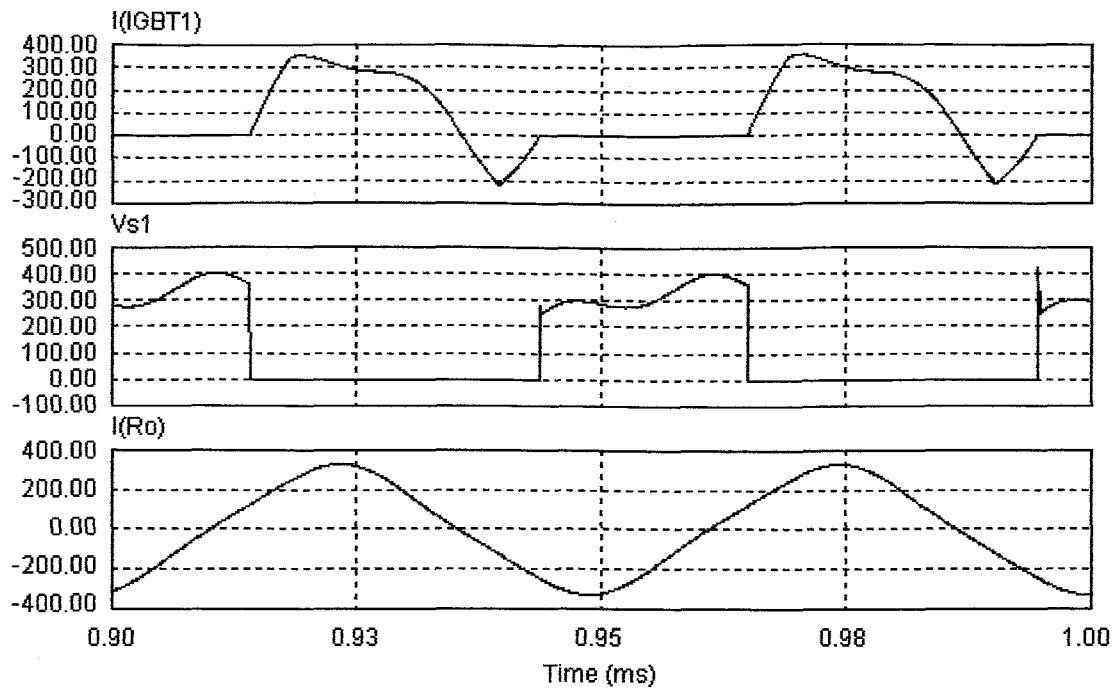
図 5.40  $P_o/I_{smax}=174.9$  の時の波形



$L_s=9.29 \mu H, C_p=0.687 \mu F, C_s=0.89 \mu F, f_s=21kHz, E_d=270V$

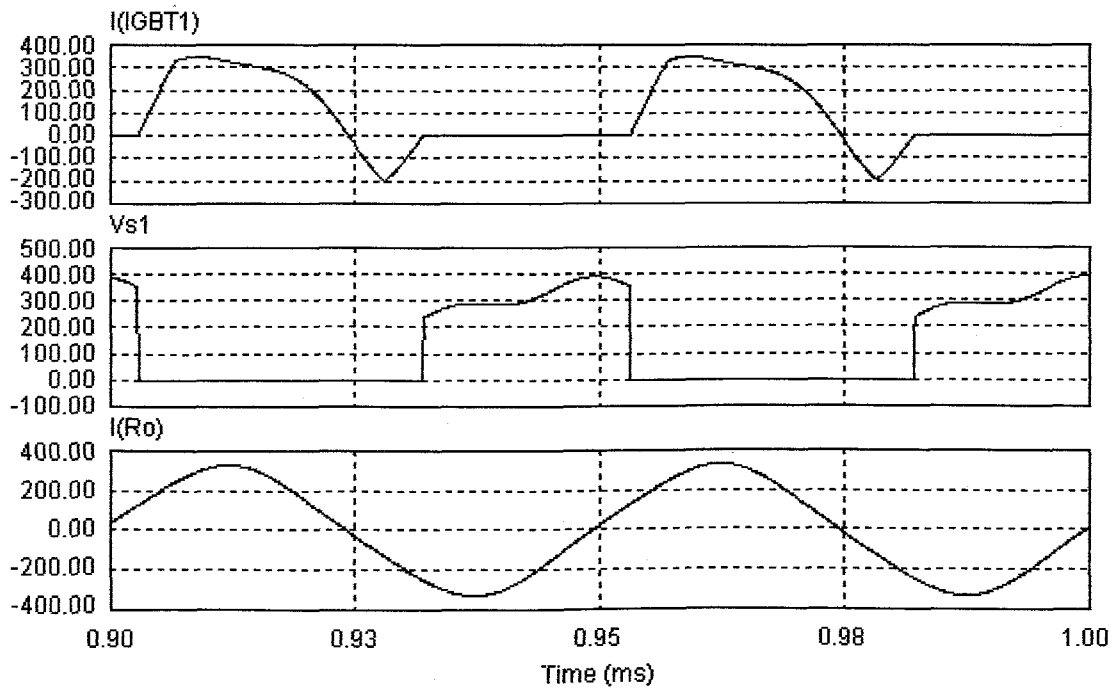
$I_{smax}=385.0A, V_{smax}=422.4V, I_{orms}=198.2A, P_o=39.3kW, P_o/I_{smax}=102.1$

図 5.41 負荷定数  $L_o=55 \mu H, R_o=1 \Omega$



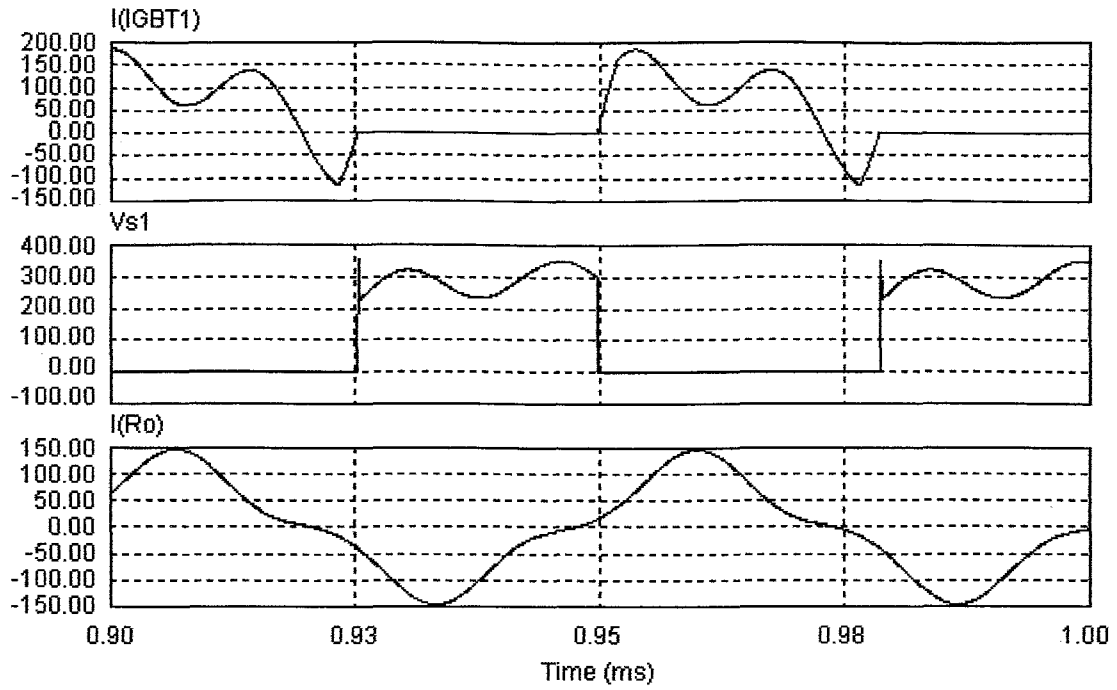
$L_s=14.12 \mu H, C_p=0.452 \mu F, C_s=0.643 \mu F, f_s=21kHz, E_d=270V$   
 $I_{smax}=354.5A, V_{smax}=402.1V, I_{orms}=219.8A, P_o=48.3kW, P_o/I_{smax}=136.2$

图 5.42 负荷定数  $L_o=75 \mu H, R_o=1 \Omega$



$L_s=18.76 \mu H, C_p=0.34 \mu F, C_s=0.504 \mu F, f_s=21kHz, E_d=270V$   
 $I_{smax}=348.5A, V_{smax}=393.1V, I_{orms}=223.8A, P_o=50.1kW, P_o/I_{smax}=143.8$

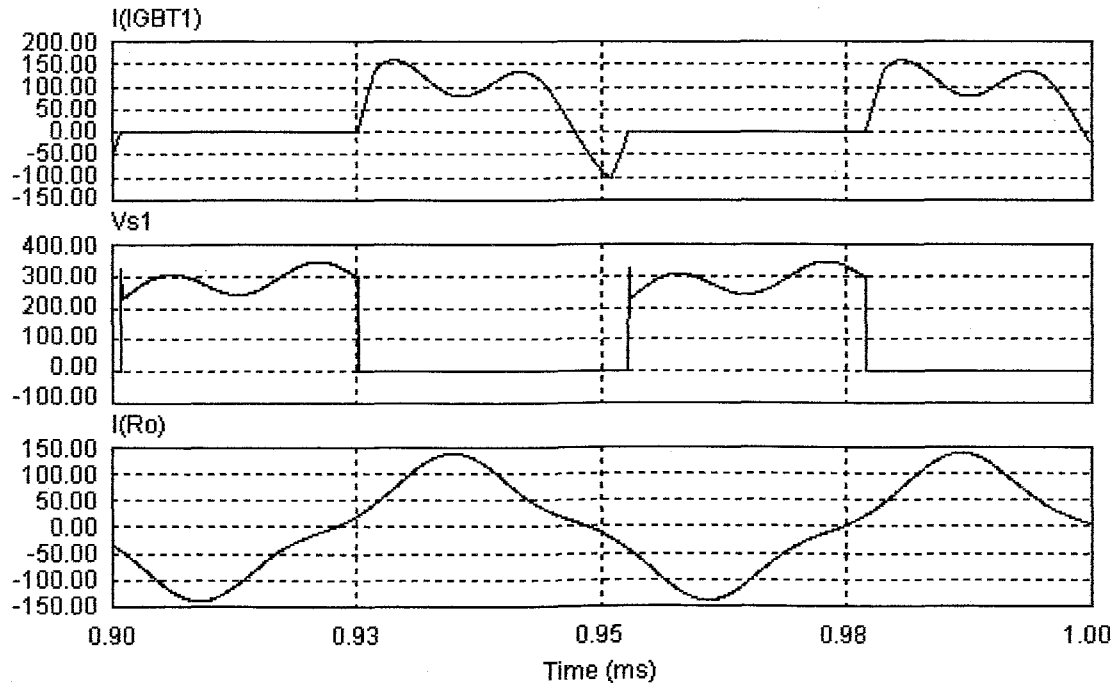
图 5.43 负荷定数  $L_o=95 \mu H, R_o=1 \Omega$



$L_s=10.84 \mu\text{H}$ ,  $C_p=0.589 \mu\text{F}$ ,  $C_s=0.847 \mu\text{F}$ ,  $f_s=21\text{kHz}$ ,  $E_d=270\text{V}$

$I_{s\max}=184.7\text{A}$ ,  $V_{s\max}=352.4\text{V}$ ,  $I_{o\text{rms}}=84.7\text{A}$ ,  $P_o=21.5\text{kW}$ ,  $P_o/I_{s\max}=116.4$

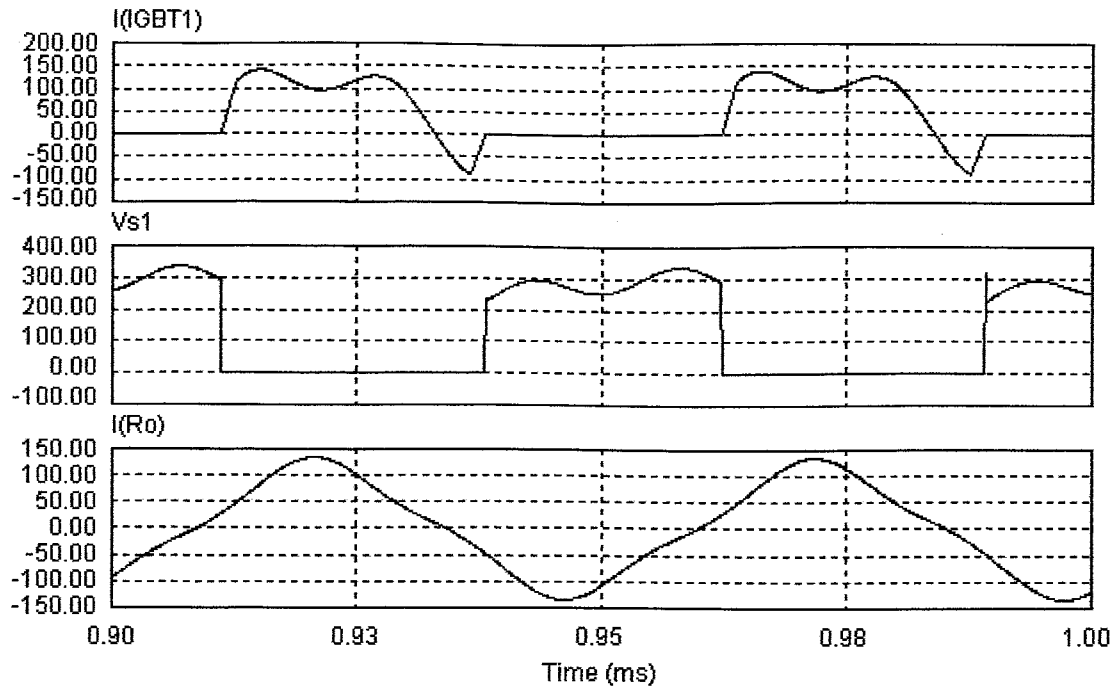
图 5.44 负荷定数  $L_o=55 \mu\text{H}$ ,  $R_o=3 \Omega$



$L_s=14.81 \mu\text{H}$ ,  $C_p=0.431 \mu\text{F}$ ,  $C_s=0.629 \mu\text{F}$ ,  $f_s=21\text{kHz}$ ,  $E_d=270\text{V}$

$I_{s\max}=159.0\text{A}$ ,  $V_{s\max}=345.9\text{V}$ ,  $I_{o\text{rms}}=84.5\text{A}$ ,  $P_o=21.4\text{kW}$ ,  $P_o/I_{s\max}=134.6$

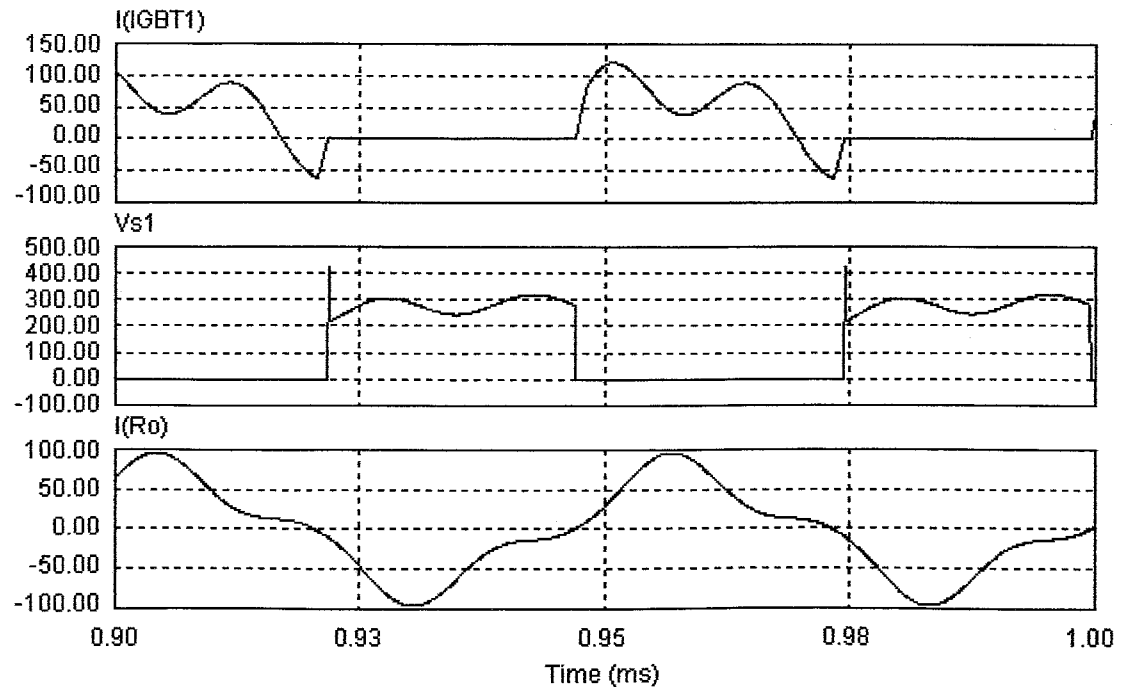
图 5.45 负荷定数  $L_o=75 \mu\text{H}$ ,  $R_o=3 \Omega$



$L_s=19.63 \mu\text{H}$ ,  $C_p=0.325 \mu\text{F}$ ,  $C_s=0.496 \mu\text{F}$ ,  $f_s=21\text{kHz}$ ,  $E_d=270\text{V}$

$I_{s\max}=141.0\text{A}$ ,  $V_{s\max}=336.0\text{V}$ ,  $I_{o\text{rms}}=84.5\text{A}$ ,  $P_o=21.4\text{kW}$ ,  $P_o/I_{s\max}=151.8$

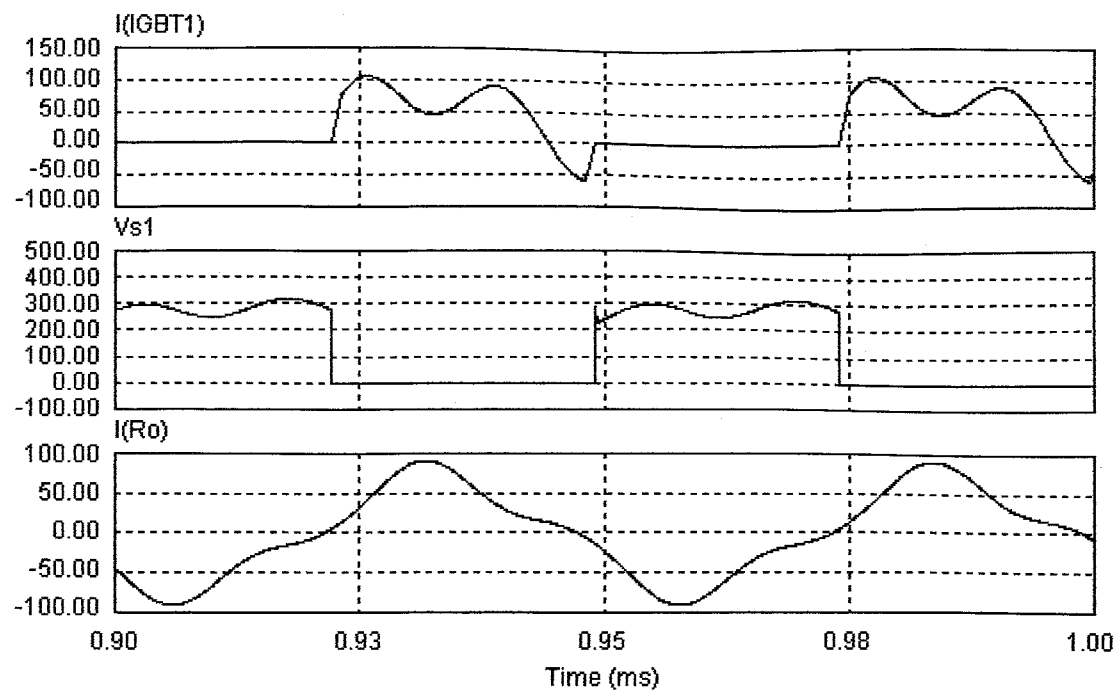
图 5.46 负荷定数  $L_o=95 \mu\text{H}$ ,  $R_o=3 \Omega$



$L_s=13.38 \mu\text{H}$ ,  $C_p=0.477 \mu\text{F}$ ,  $C_s=0.78 \mu\text{F}$ ,  $f_s=21\text{kHz}$ ,  $E_d=270\text{V}$

$I_{s\max}=120.5\text{A}$ ,  $V_{s\max}=320.2\text{V}$ ,  $I_{o\text{rms}}=54.2\text{A}$ ,  $P_o=14.7\text{kW}$ ,  $P_o/I_{s\max}=122.0$

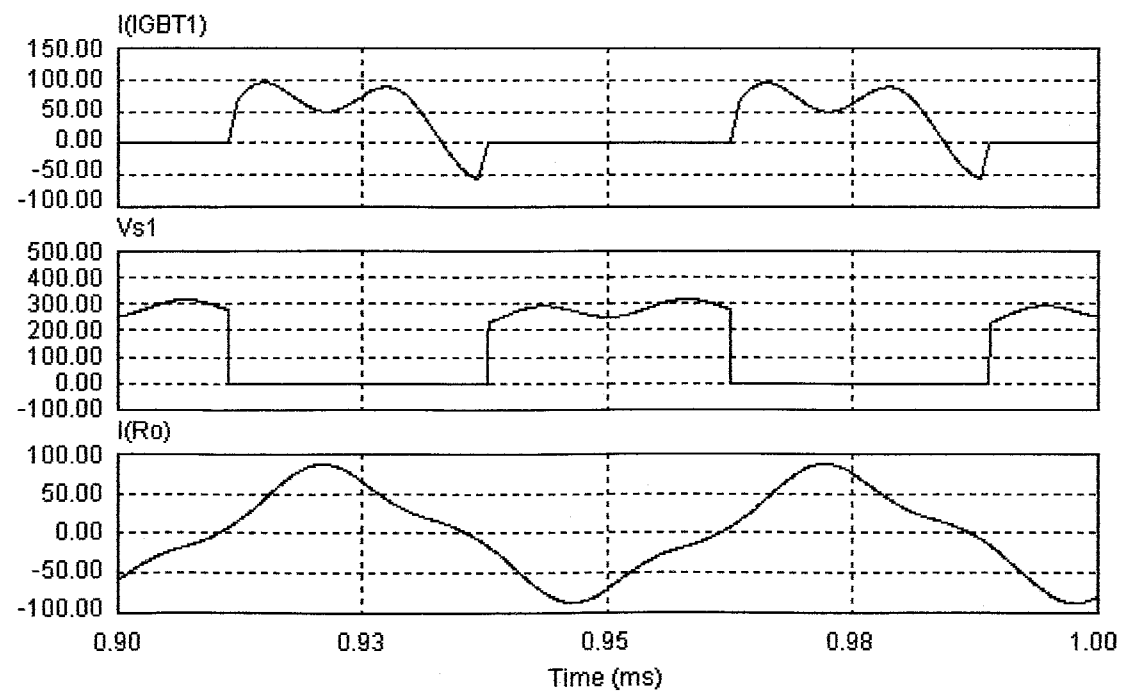
图 5.47 负荷定数  $L_o=55 \mu\text{H}$ ,  $R_o=5 \Omega$



$L_s=17.13 \mu\text{H}$ ,  $C_p=0.373 \mu\text{F}$ ,  $C_s=0.598 \mu\text{F}$ ,  $f_s=21\text{kHz}$ ,  $E_d=270\text{V}$

$I_{s\max}=105.2\text{A}$ ,  $V_{s\max}=319.1\text{V}$ ,  $I_{o\text{rms}}=53.2\text{A}$ ,  $P_o=14.2\text{kW}$ ,  $P_o/I_{s\max}=135.0$

图 5.48 负荷定数  $L_o=75 \mu\text{H}$ ,  $R_o=5 \Omega$



$L_s=20.91 \mu\text{H}$ ,  $C_p=0.305 \mu\text{F}$ ,  $C_s=0.483 \mu\text{F}$ ,  $f_s=21\text{kHz}$ ,  $E_d=270\text{V}$

$I_{s\max}=95.3\text{A}$ ,  $V_{s\max}=316.7\text{V}$ ,  $I_{o\text{rms}}=52.9\text{A}$ ,  $P_o=14.0\text{kW}$ ,  $P_o/I_{s\max}=146.9$

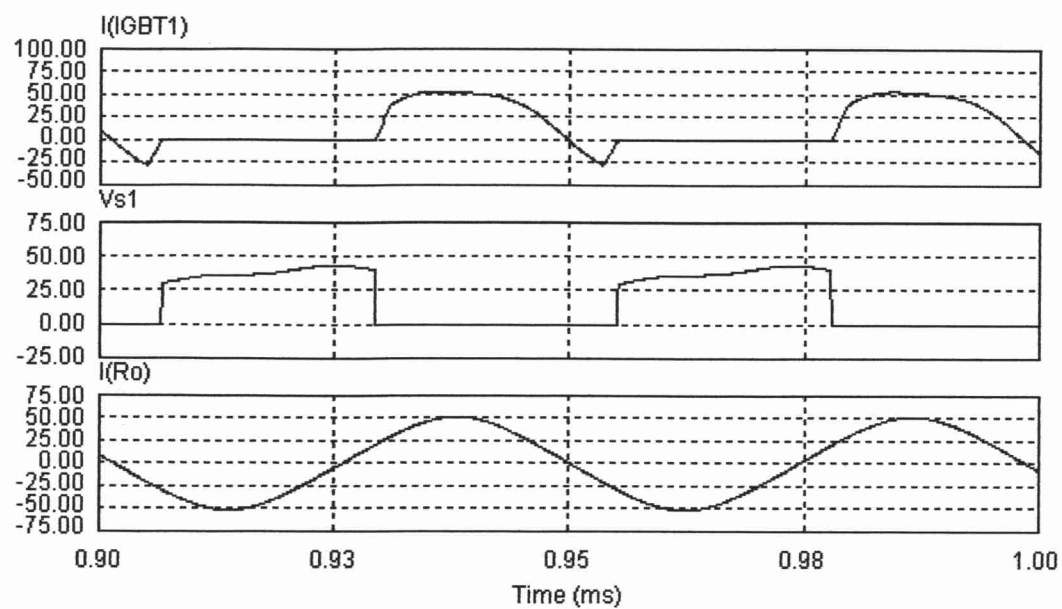
图 5.49 负荷定数  $L_o=95 \mu\text{H}$ ,  $R_o=5 \Omega$

表 5.1 各  $p$  における  $P_o/I_{smax}$  の値 (入力電圧 50V)

$p$	$I_{smax}[A]$	$V_{smax}[V]$	$I_{orms}[A]$	$P_o[W]$	$P_o/I_{smax}$
23	90.88	64.98	58.75	2519.6	27.72
24	89.95	64.79	58.97	2538.5	28.22
25	90.30	64.40	59.16	2554.9	28.29
26	90.23	64.03	59.26	2563.6	28.41
27	90.60	63.55	59.16	2554.9	28.20
28	90.37	63.47	59.19	2557.5	28.30
29	90.34	63.27	59.24	2561.8	28.36
30	90.71	63.08	59.32	2568.8	28.32

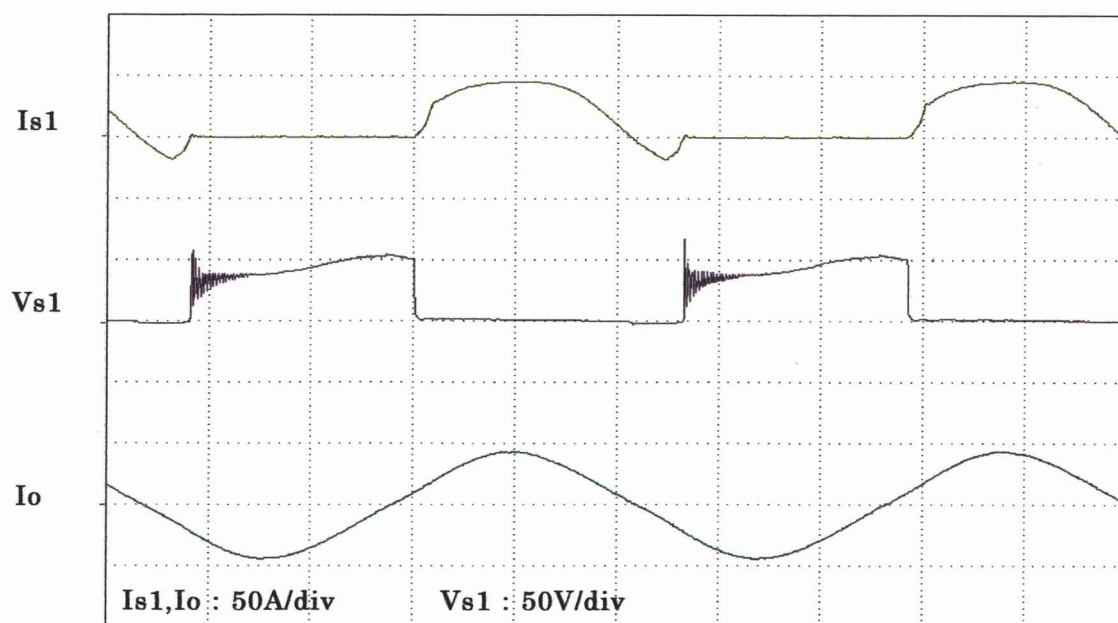
この結果から  $P_o/I_{smax}$  が最大値をとる  $p=26$  のときが最適な回路パラメーターだと分かる。以上の解析・シミュレーション結果をもとに高周波誘導加熱電源としての複合共振回路定数の設計値として、 $L_s=17.2\mu H$ ,  $C_p=0.34\mu F$ ,  $C_s=0.5\mu F$  が求まる。これらの値をもとに回路実装では、 $L_s=17.9\mu H$ ,  $C_p=0.312\mu F$ ,  $C_s=0.52\mu F$  を実用上の値として用い、誘導加熱におけるフィルタの加熱再生実験を実施した。図 5.50, 5.51 にシミュレーション波形と実験時の動作波形の比較を示す。2 つの波形は良く一致しており、前述のシミュレーション結果が実験時にも成立することが確認できた。





$E_d=38\text{V}, L_o=86.8\text{ }\mu\text{H}, R_o=0.73\text{ }\Omega, L_s=17.9\text{ }\mu\text{H}, C_p=0.312\text{ }\mu\text{F}, C_s=0.52\text{ }\mu\text{F}$

図 5.50 シミュレーション波形



$E_d=38\text{V}, L_o=86.8\text{ }\mu\text{H}, R_o=0.73\text{ }\Omega, L_s=17.9\text{ }\mu\text{H}, C_p=0.312\text{ }\mu\text{F}, C_s=0.52\text{ }\mu\text{F}$

図 5.51 実験波形

## 第6章 システムの耐久実験および考察

次に 4.3 節で述べた円筒状金属フィルタと 5 章で述べた複合共振回路を用いたシステムの耐久実験について述べる。排出微粒子低減システムの耐久実験の概要は、まず捕集実験を行う。そして、金属フィルタでの圧力損失が **7kPa** を超えた時点で金属フィルタが目詰まりを起こしたとみなす。この目詰まりを起こした金属フィルタを第 5 章で述べた複合共振 ZCS 高周波インバータを用いて加熱し、排出微粒子を燃焼除去して金属フィルタを再生する。この操作を 1 サイクルとして 10 サイクル行い、スモークメータにおける黒煙濃度の変化から金属フィルタの捕集・加熱再生実験における耐久性能を検討する。また、金属フィルタにおける圧力損失の変化から灰分による目詰まりへの影響および金属フィルタの耐久性を検討する。さらに、連続黒煙発生時における捕集可能時間(ディーゼルエンジンの始動回数×1 回の捕集時間 5 秒)の変化からシステム全体の有効性および課題を検討する。

1 回目捕集実験の結果を表 6.1 に示す。フィルタでの圧力損失は、5 回目の捕集まで約 **3kPa** 程度で大きな変化はなかった。しかし、6 回目捕集後から次第に圧力損失が大きくなり始めた。これはフィルタが目詰まりを起こし始めたためと考えられる。また、連続黒煙発生時における捕集可能時間は、約 55 秒(11 回×5 秒)でこの期間での排出微粒子低減率は、96.2%となっている。

表 6.1 フィルタ誘導加熱処理前の捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	10	15	10	0	0.5	0	0
圧力損失[kPa]	3.24	3.16	3.10	3.16	3.10	3.80	4.18

8	9	10	11	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	0	0	3.2	96.2
4.68	5.58	6.60	7.32	4.36	-

次に排出微粒子を捕集し終わったフィルタの加熱再生実験に移る。従来型の円筒状セラミックフィルタによる加熱再生実験では、出力 **2kW** で約 40 分間加熱してフィルタの再生を行った。そしてフィルタの加熱再生に要した投入電力量は、**1.46kWh** であった。この結果を踏まえて、投入電力を **5kW** として短時間でのフィルタの再生を試みるとともに投入電力量の低減を図る。この加熱再生実験において図 6.1 に示すようにフィルタの温度上昇があまりにも早く投入電力を調節しての温度制御が追いつかなかった。そのためフィルタの耐熱温度 **1000℃** を超えてしまった。一方、捕集した排出微粒子の燃焼除去については図 6.2, 6.3 に示すように捕集した排出微粒子をほぼ完全に燃焼除去することができており、加熱時間約 1 分という短時間でのフィルタの再生に成功した。さらに、このときの投入電力量は **0.081kWh** で円筒状セラミックフィルタでの投入電力量の約 1/18 となり、投入電力量も大きく低減することができた。

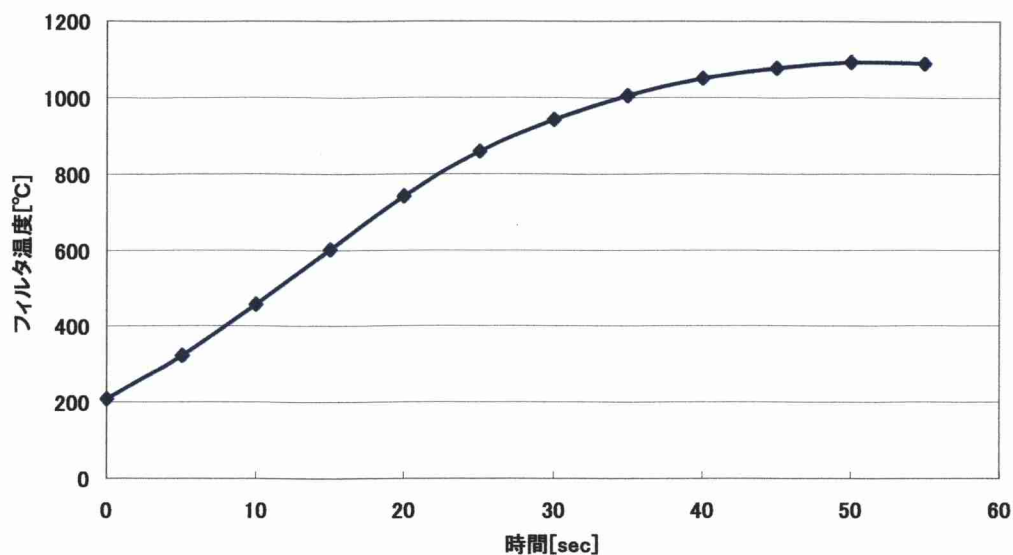


図 6.1 1 回目加熱再生実験におけるフィルタの温度上昇



図 6.2 捕集後の金属フィルタ



図 6.3 加熱再生後の金属フィルタ

この再生した金属フィルタを使用した 2 回目捕集実験の結果を表 6.2 に示す。この実験結果より 1 回目捕集実験と同様にフィルタでの圧力損失は、5 回目の捕集まで約 3kPa 程度で、その後 6 回目捕集から次第に圧力損失が大きくなり始めた。また、連続黒煙発生時における捕集可能時間は約 55 秒でこの期間での排出微粒子低減率は 98.5%である。したがって、捕集実験および加熱再生実験によるフィルタの劣化は今のところ見受けられない。

表 6.2 2 回目捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	9.5	4.5	0	0	0	0	0
圧力損失[kPa]	3.16	3.10	3.16	3.16	3.26	3.64	4.06

8	9	10	11	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	0	0	1.3	98.5
4.68	5.80	6.70	7.26	4.36	-

この捕集後の金属フィルタを再び誘導加熱実験によって再生させる。加熱条件は、1 回目加熱再生実験で温度制御が追いつかなかったことを踏まえてフィルタ温度が 700℃程度になるように投入電力を調節し、フィルタ温度が 700℃に達してから約 3 分間加熱した(図 6.4 参照)。その結果、図 6.5 に示すようにフィルタの両端に多少燃え残りが生じた。そこでフィルタの燃え残りを加熱除去するために図 6.6 に示すようにフィルタの加熱温度を 1000℃まで上げ、さらに加熱時間を 3 分から 4 分に延ばして再度加熱再生実験を行った。しかし、図 6.5 と同様にフィルタの両端に排出微粒子が燃え残ってしまい加熱温度を 1000℃に上げ、加熱時間を 4 分に延ばした効果が全くみられなかった。そのためこれ以上フィルタの加熱温度を上昇させても排出微粒子の燃焼除去に大きな影響を及ぼさないと考え、今回はフィルタの両端に残った排出微粒子を人為的に取り除いた。

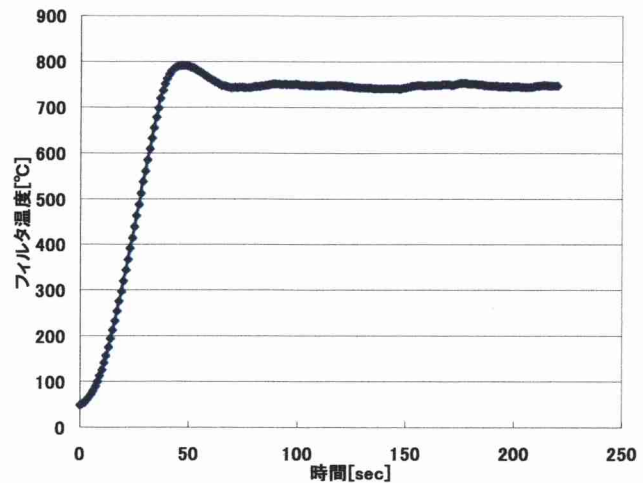


図 6.4 2 回目加熱実験時のフィルタ温度上昇

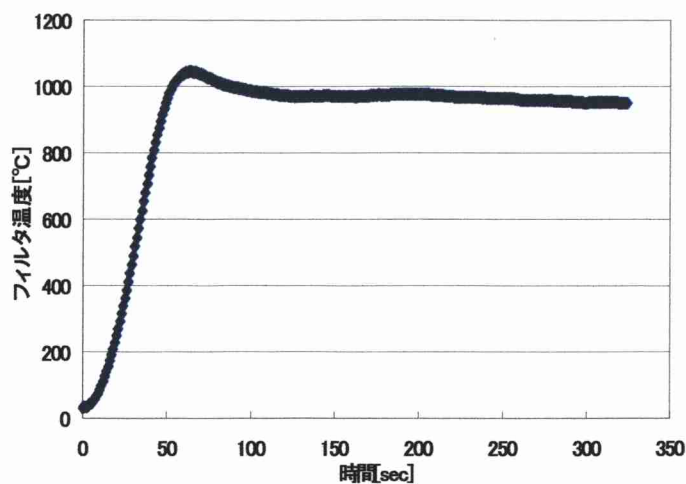


図 6.6 2 回目再加熱実験時のフィルタ温度上昇



図 6.5 2 回目加熱実験後のフィルタ



このフィルタを使用して 3 回目の捕集実験を行った。その結果を表 6.3 に示す。1,2 回目捕集実験と比べると圧力損失が上昇し始める時期が少し早まり、全体的に圧力損失が高い傾向にある。この原因として 2 回目加熱再生実験において燃え残った排出微粒子を人為的に取り除いたため完全に排出微粒子を除去することができなかったためと考えられる。

表 6.3 3 回目の捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	12	9	1	0.5	0	0	0
圧力損失[kPa]	3.08	3.00	3.10	3.26	3.44	3.88	4.28

8	9	10	11	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	0	0	2.0	97.6
4.88	6.00	6.94	7.50	4.49	-

3 回目加熱再生実験は、図 6.7 に示すようにフィルタを 700～800℃に加熱して約 5 分間行った。その結果、図 6.8 に示すように 2 回目加熱再生実験における実験結果よりも再生部分の面積が明らかに狭くなっている。そこでワーキングコイルの巻き方を図 6.9 に示す隙間のないように巻いた密巻きから図 6.10 に示すように排出微粒子を燃焼除去することができた中央部に少し隙間を空けた疎巻きにし、排出微粒子が燃え残ったフィルタの両端部分のワーキングコイルを密に巻いた形状に変更した。これにより燃え残りのあったフィルタ両端を加熱しやすくし、燃え残りを低減しようと考えた。この形状で再び 700～800℃で 5 分間フィルタを加熱した。その結果、図 6.11 に示すようにフィルタの再生部分の面積は広がったが、フィルタの両端は燃え残ってしまった。この燃え残った部分は、人為的に取り除いて 4 回目捕集実験を行った。その実験結果を表 6.4 に示す。フィルタでの圧力損失は、3 回目捕集実験時と比べて全体的に高くなっていることがわかる。

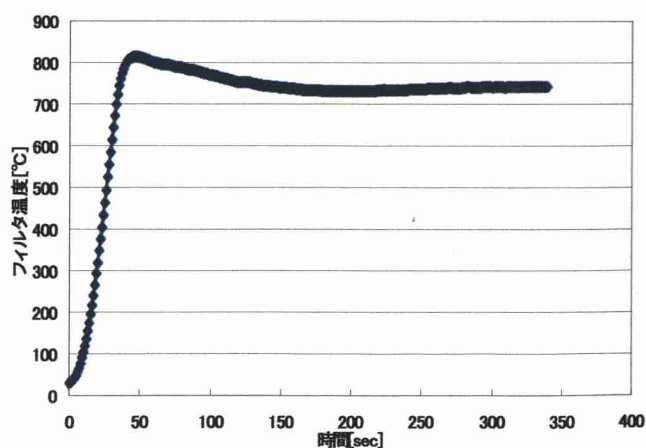


図 6.7 3 回目加熱実験時のフィルタ温度上昇



図 6.8 3 回目加熱後のフィルタ



図 6.11 再加熱実験後



図 6.9 密巻き

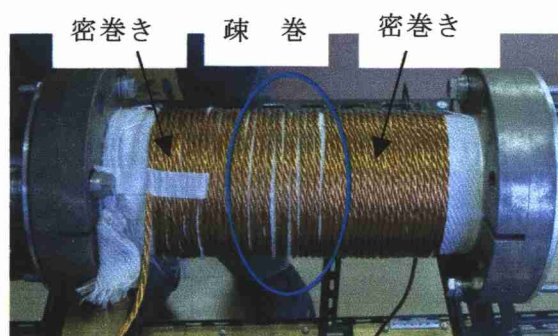


図 6.10 密・疎・密巻き 1

表 6.4 4 回目捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	21	22	10	0	0	0	0
圧力損失[kPa]	3.06	3.18	3.06	3.06	3.32	3.76	4.26

8	9	10	11	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	0	0	4.8	94.3
5.06	5.92	6.78	7.36	4.44	-

4 回目加熱再生実験においては、図 6.12 に示すようにワーキングコイルの中央部を更に疎巻きにしてフィルタの両端が加熱されやすくなるようにした。加熱は、3 回目加熱再生実験と同様に 700～800℃で 5 分間とした。その結果、図 6.13 に示すようにフィルタの両端およびフィルタ中央部も燃え残り全く再生することができなかった。



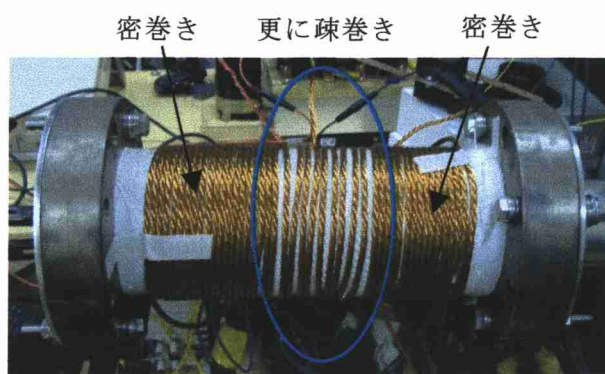


図 6.12 密-疎-密巻き 2



図 6.13 4回目加熱実験後

以上の加熱再生実験結果をまとめると1回目加熱再生実験では、フィルタの加熱最高温度は約  $1090^{\circ}\text{C}$  で約1分間の加熱でほぼ完全にフィルタを再生することができた。2回目加熱再生実験では、 $700\sim 800^{\circ}\text{C}$  で3分間、さらに約  $1000^{\circ}\text{C}$  で4分間加熱した。しかし、加熱温度を上げ、加熱時間を長くしたことによるフィルタの再生面積への影響が見られなかった。3回目加熱再生実験では、 $700\sim 800^{\circ}\text{C}$  で5分間加熱した。しかし、フィルタの再生できた面積は2回目加熱再生実験時の  $700\sim 800^{\circ}\text{C}$  ,3分での再生面積より明らかに狭くなっていた。このようにフィルタの加熱温度・加熱時間とフィルタの再生面積に比例関係が成り立たなかった原因として次のようなことが考えられる。

1回目および2回目加熱再生実験時に耐熱温度を超えたことと加熱再生実験の繰り返しによって、図 6.14 に示すようにろ材であるベクラリの溶接部分が加熱処理前と比べて開いてしまったことが挙げられる。つまり、1回目加熱再生実験時はベクラリの溶接部に開きがなく、渦電流がベクラリに集中し、ベクラリ全体が加熱された。これにより短時間での再生が可能となった。その後、溶接部が開いたことにより渦電流の流れに影響を及ぼし、ベクラリの内側に配置した SUS316L のパンチングメタルに渦電流が集中するようになり、SUS316L のパンチングメタルが加熱されるようになった。そして、ソレノイド状ワーキングコイルの特徴としてワーキングコイルの長さ方向における中央部が一番加熱されるため、ベクラリの中央部がパンチングメタルからの伝熱によって再生されたものと考えられる。したがって、今後ろ材としてベクラリを使用する際はフィルタの構造(特に溶接部)を再検討する必要がある。また、温度制御にも十分な注意が必要である。

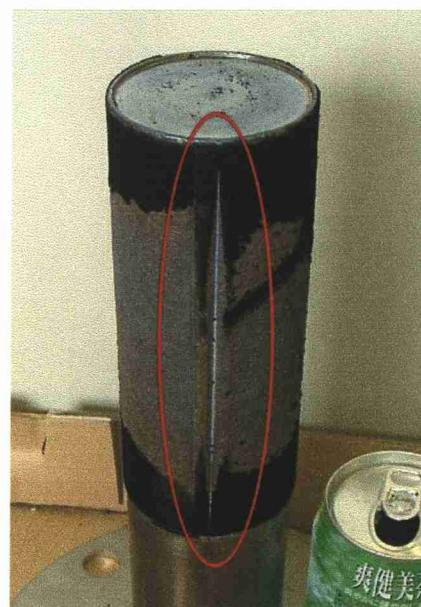


図 6.14 溶接部の開き

以後の実験として温度制御をしっかりと行えば1回目加熱再生実験時のようにフィルタを短時間で再生することが可能であると仮定して、フィルタの加熱再生実験による加熱・冷却に対する耐久性と排出微粒子捕集実験時の排気ガス圧力に対する耐久性を検討するために実験を続けることとする。なお、加熱再生実験ではフィルタ温度を700～900℃、加熱時間を5～10分間とする。また、加熱再生実験後、燃え残った排出微粒子については人為的に除去して捕集実験に移行するものとする。表6.5～6.10に5回目捕集実験から10回目捕集実験の結果を示す。また、図6.15,6.16に1回目～10回目捕集実験時の金属フィルタにおける圧力損失と黒煙濃度の推移を示す。さらに各捕集実験時のろ紙の汚染状態を図6.17～6.26に示す。なお、7回目捕集実験時の圧力損失の測定結果は、差圧計の設置ミスのため信用のできないデータである。

表 6.5 5回目捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	21	12	5	1	2	0	0
圧力損失[kPa]	2.98	3.14	2.92	3.04	3.36	3.90	4.28

8	9	10	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	0	4.1	95.1
5.26	6.40	7.18	4.25	-

表 6.6 6回目捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	20	18	0	0	0	0	0
圧力損失[kPa]	2.84	2.96	2.96	3.12	3.36	3.76	4.46

8	9	10	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	0	3.8	95.5
5.50	6.50	7.20	4.27	-

表 6.7 7回目捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	9	3	0.5	1	0	0	0
圧力損失[kPa]	1.90	1.90	4.54	4.56	4.42	3.85	6.26

8	9	10	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	0	1.4	98.3
6.50	6.76	9.08	4.98	-

表 6.8 8回目捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6
黒煙濃度[%]	-	14	5	2	2	0
圧力損失[kPa]	2.86	2.98	3.28	3.54	4.02	4.88

7	8	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	-	-
6.38	7.08	4.38	-

表 6.9 9回目捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6
黒煙濃度[%]	24	12	8	0	0	0
圧力損失[kPa]	2.78	2.98	3.06	3.20	3.70	4.22

7	8	9	平均値	排出微粒子低減率[%]
0	0	0	4.9	94.2
5.08	6.58	7.24	4.32	-

表 6.10 10回目捕集実験結果

エンジン始動回数	1	2	3	4	5	6	7
黒煙濃度[%]	14	8	2	2.5	0	0	0
圧力損失[kPa]	3.16	3.26	3.68	4.20	5.38	6.84	7.64

平均値	排出微粒子低減率[%]
3.8	95.5
4.86	-

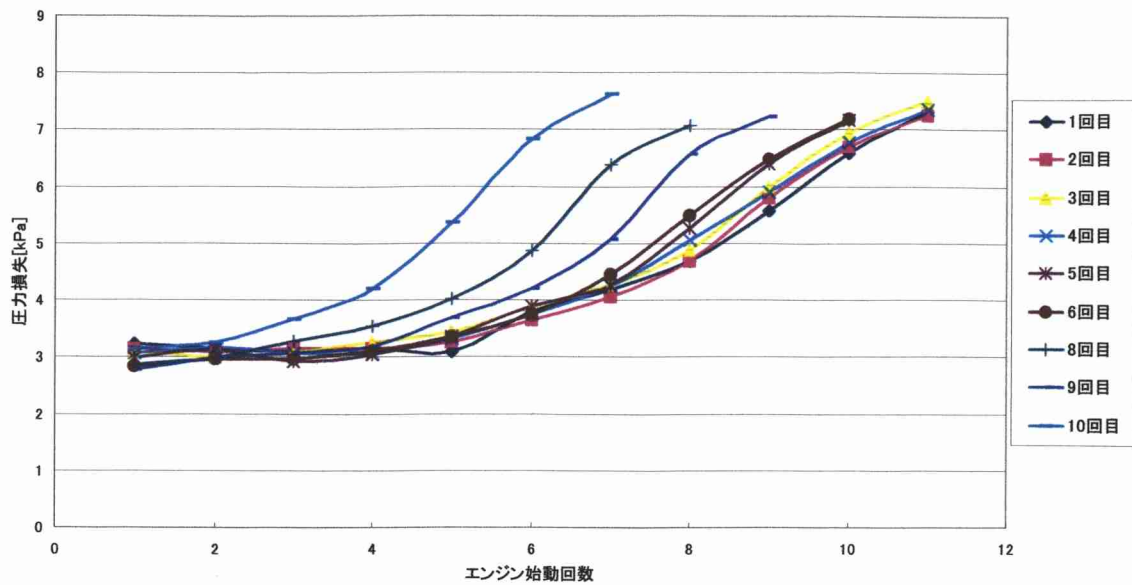


図 6.15 捕集実験における圧力損失の推移

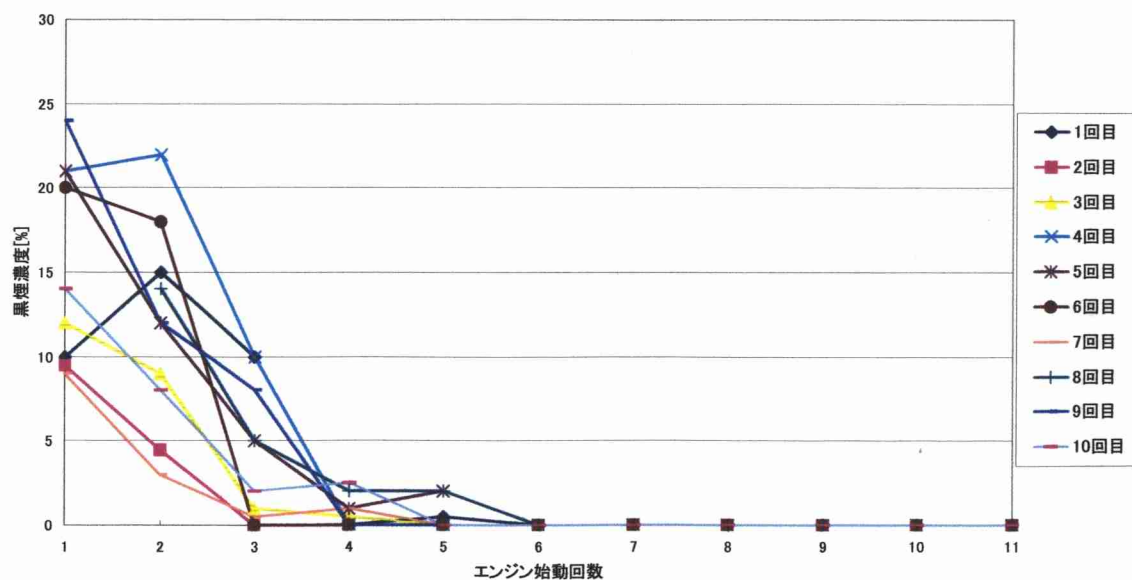


図 6.16 捕集実験における黒煙濃度の推移

10回の捕集実験結果において捕集回数が減少した理由として、フィルタの加熱再生実験においてフィルタを完全に再生できず、燃え残った排出微粒子を人為的に取り除いた影響だと考えられる。また、捕集実験時のエンジン始動回数が1～3回目において黒煙濃度が高くなっている。これは今回使用したフィルタにおいて、排出微粒子の低減能力ではなく連続黒煙発生時における捕集可能時間に重点をおいて設計したため多少目の粗いフィルタを使用した影響である。

フィルタの耐久性としては、図 6.15 を見る限り圧力損失の大きな低下が認められない。また、圧力損失の上昇傾向がほぼ一致していることからフィルタの加熱・冷却および排気圧力による大きな損傷はないと考えられる。次に1回目および2回目捕集実験時の圧力損

失を比較するとほぼ一致している。したがって、フィルタの1回目加熱再生実験において完全にフィルタが再生され、フィルタの大きな劣化もなかったと考えられる。そこで、図 6.16 の1回目捕集実験および2回目捕集実験におけるエンジン始動回数2回目をみると約10%の黒煙濃度の差が生じている。この原因としてフィルタに劣化がないと考えるとエンジンの燃焼状態によって、フィルタで捕集できない大きさの排出微粒子の排出量に違いがあったためと考えられる。したがって、エンジンの燃焼状態によっては10%程度の黒煙濃度の差は生じるものと考えられる。このように考えると図 6.16 において各黒煙濃度の値は、1回目捕集実験時の黒煙濃度の±10%以内に収まっているためフィルタに大きな劣化はないと考えられる。よって10回の捕集実験および加熱再生実験によるフィルタの大きな劣化はなかったといえる。ただし、排出微粒子捕集用フィルタとしての耐久性を検討するには、実験回数がまだ十分ではないため更なる耐久実験を行う必要がある。しかし、フィルタの構造を改善し、1回目加熱再生実験のときと同様に短時間での再生が可能となれば今後船用機関からの排出微粒子低減システムのフィルタとして非常に有望な材質および構造であると考えられる。

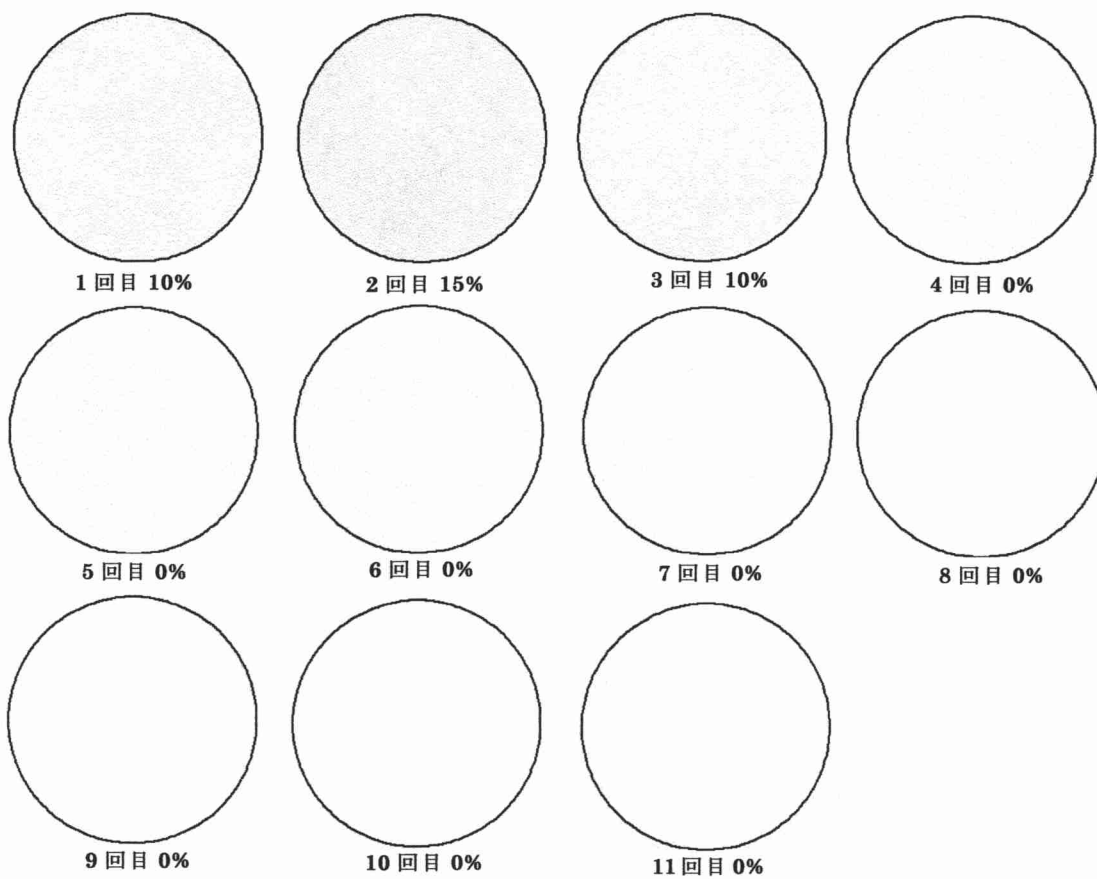


図 6.17 1回目捕集実験時のろ紙汚染度

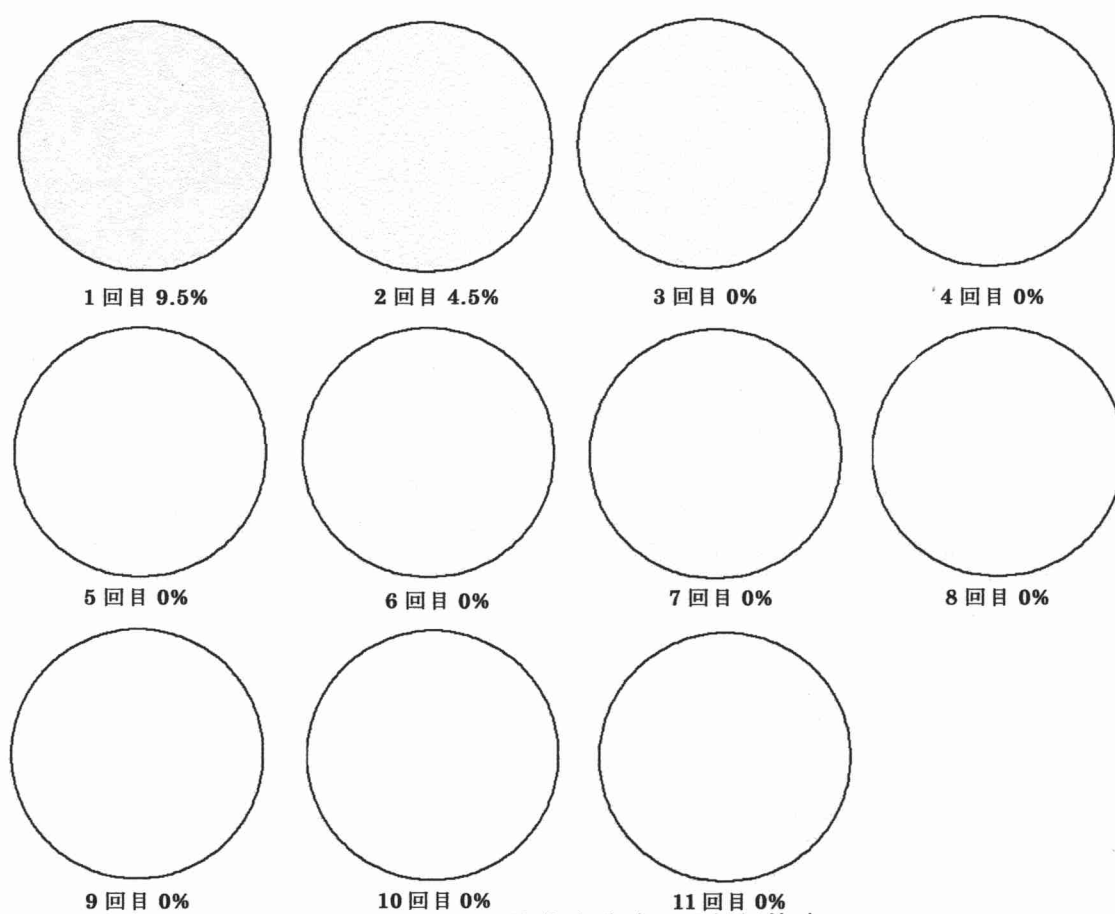


図 6.18 2回目捕集実験時のろ紙汚染度



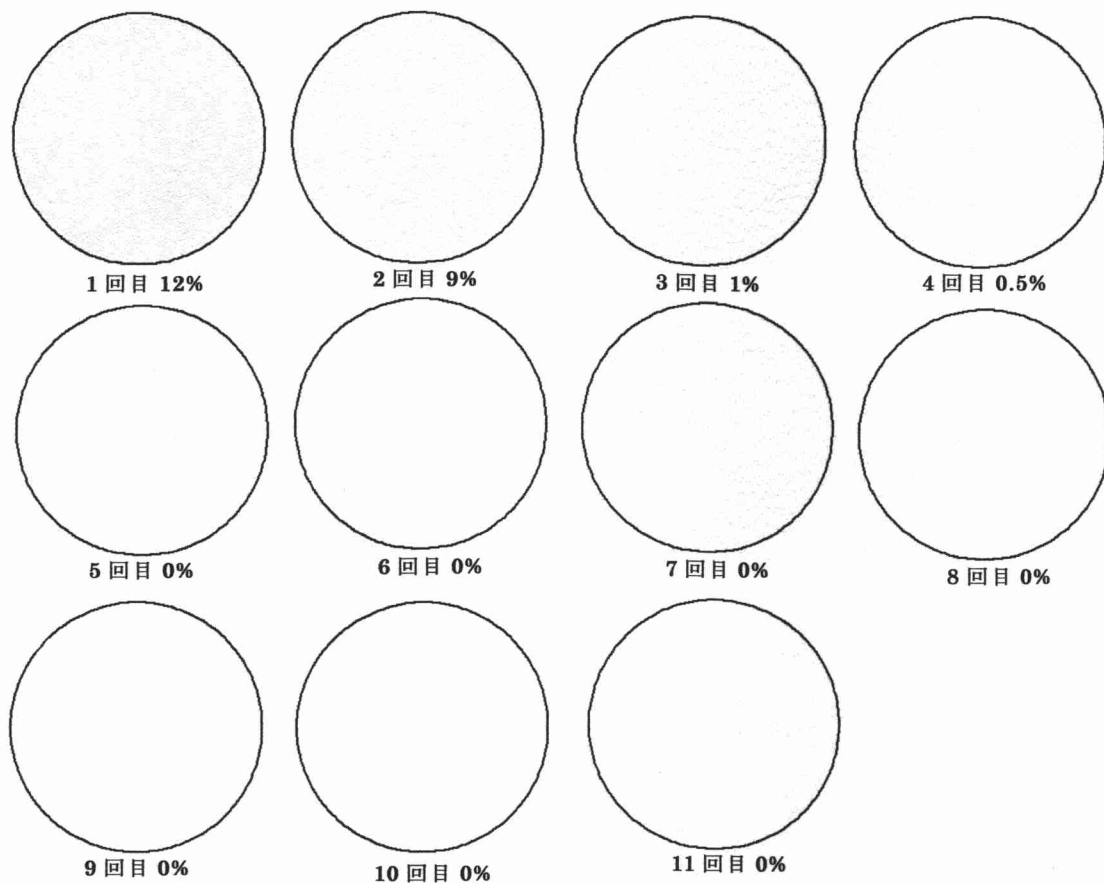


図 6.19 3回目捕集実験時のろ紙汚染度

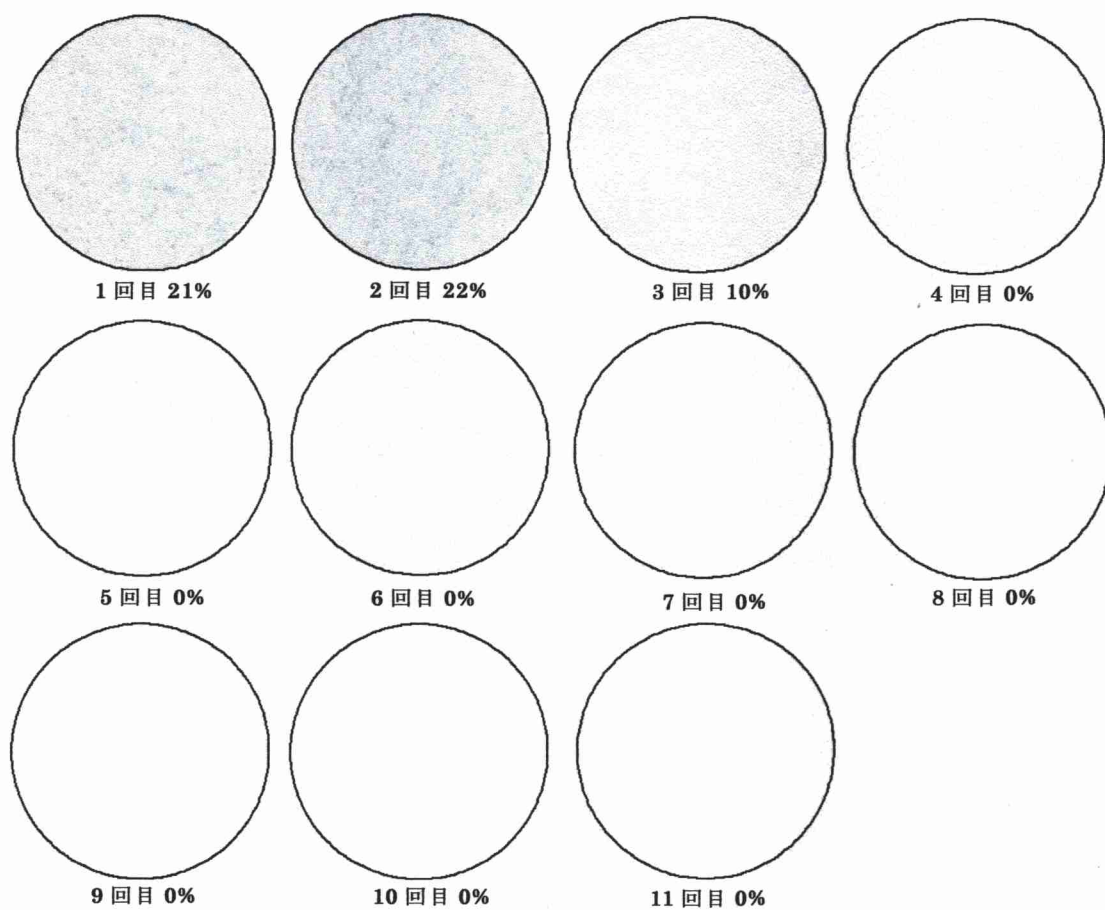


図 6.20 4回目捕集実験時のろ紙汚染度



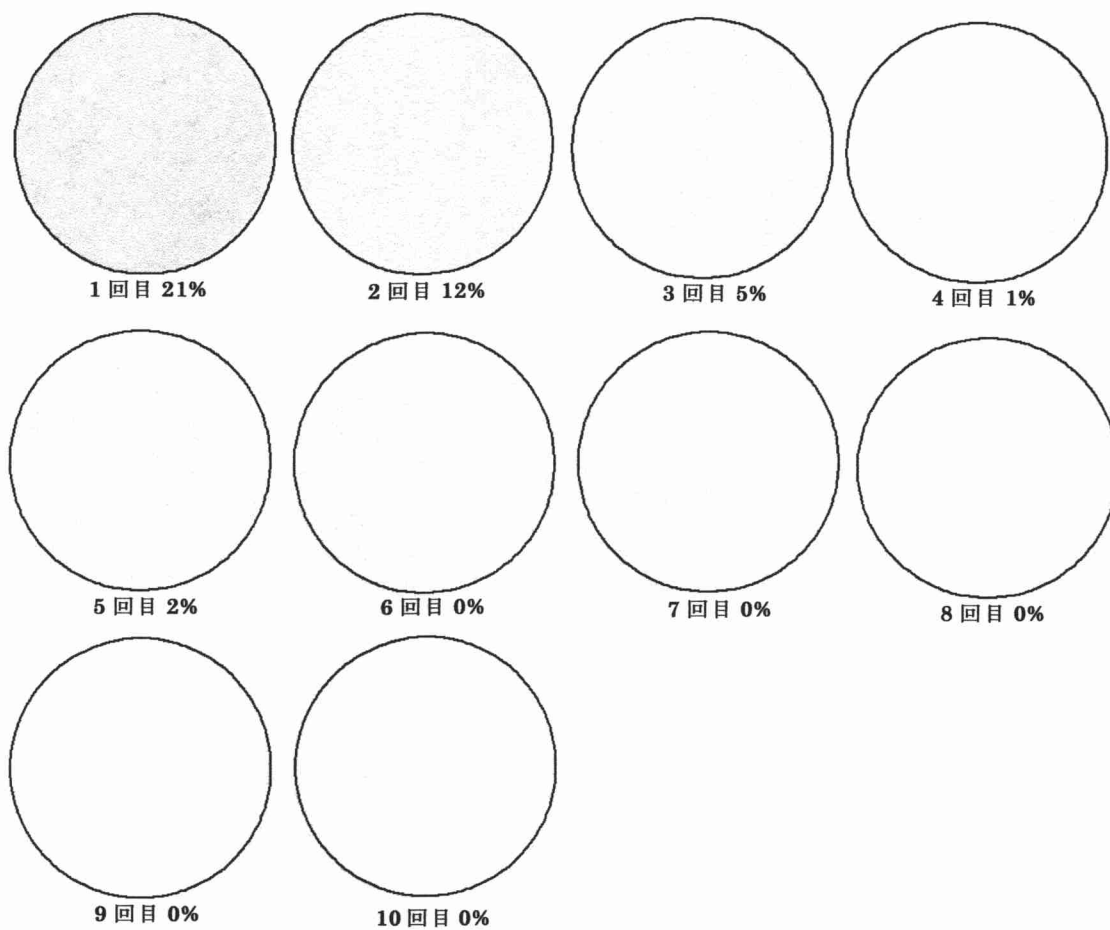


図 6.21 5回目捕集実験時のろ紙汚染度

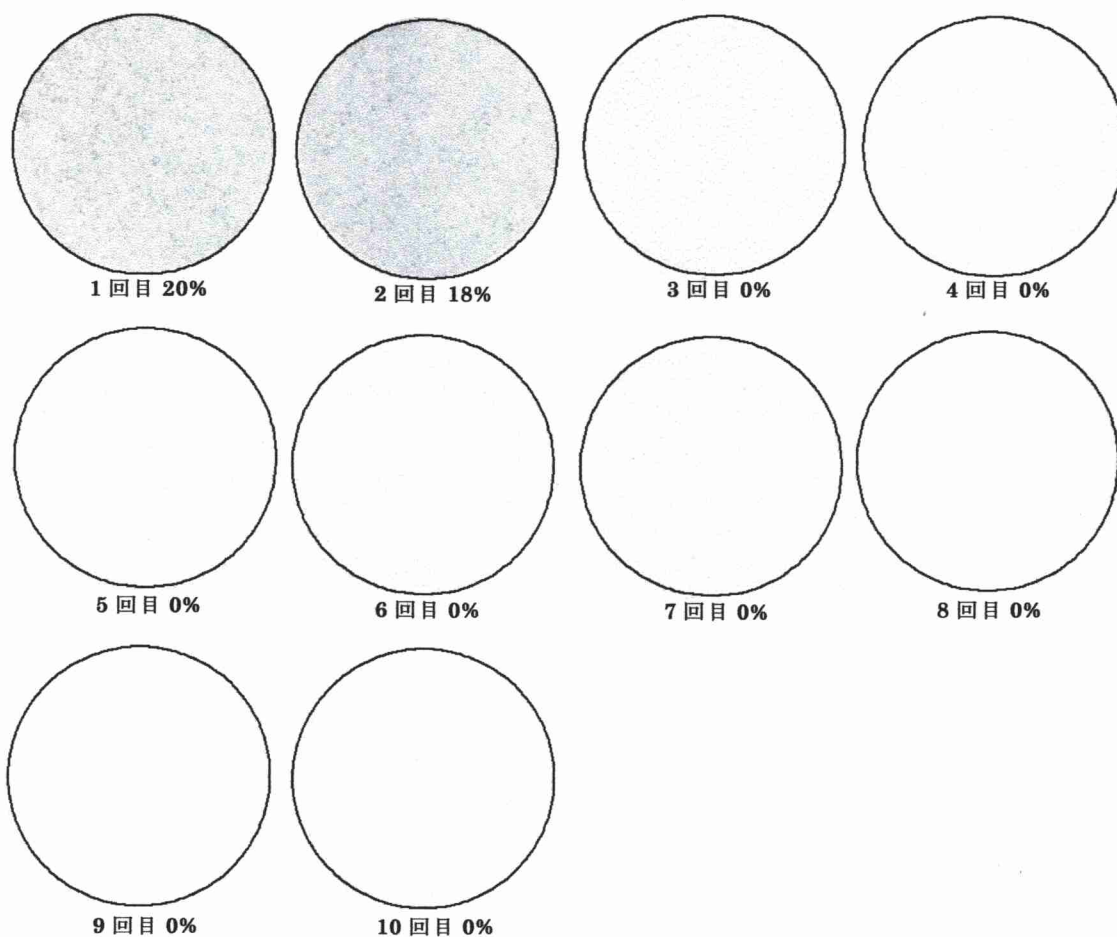


図 6.22 6回目捕集実験時のろ紙汚染度

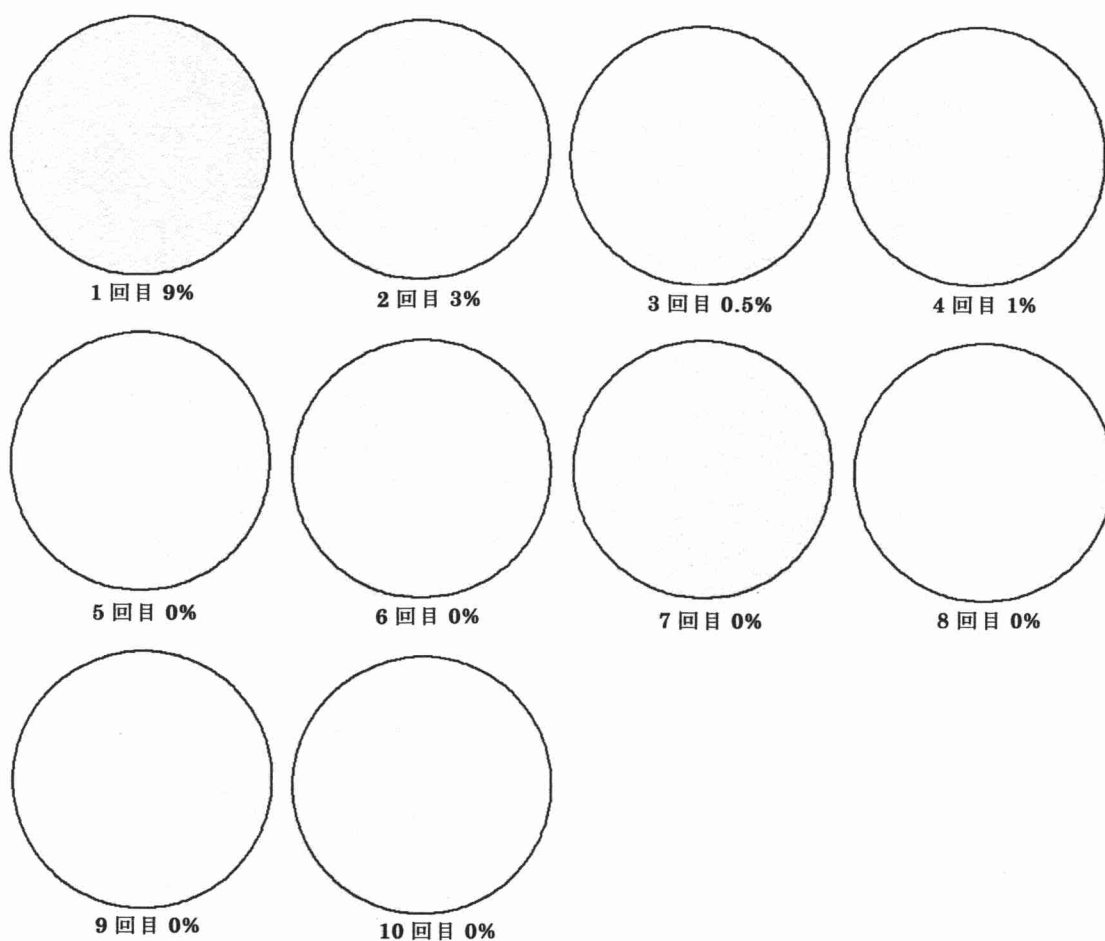


図 6.23 7回目捕集実験時のろ紙汚染度

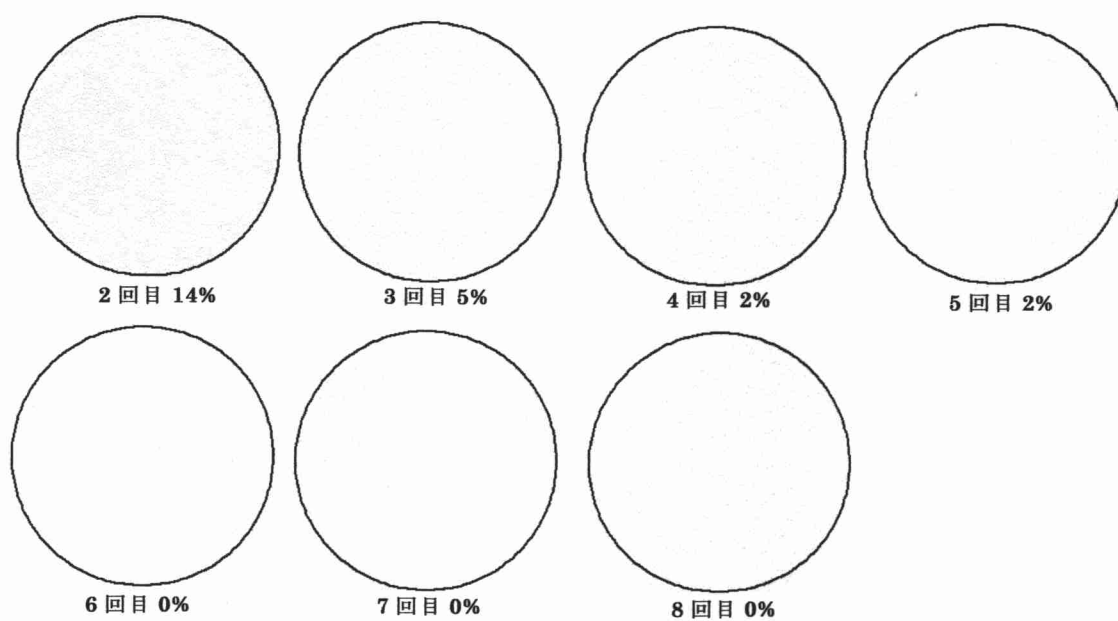


図 6.24 8回目捕集実験時のろ紙汚染度

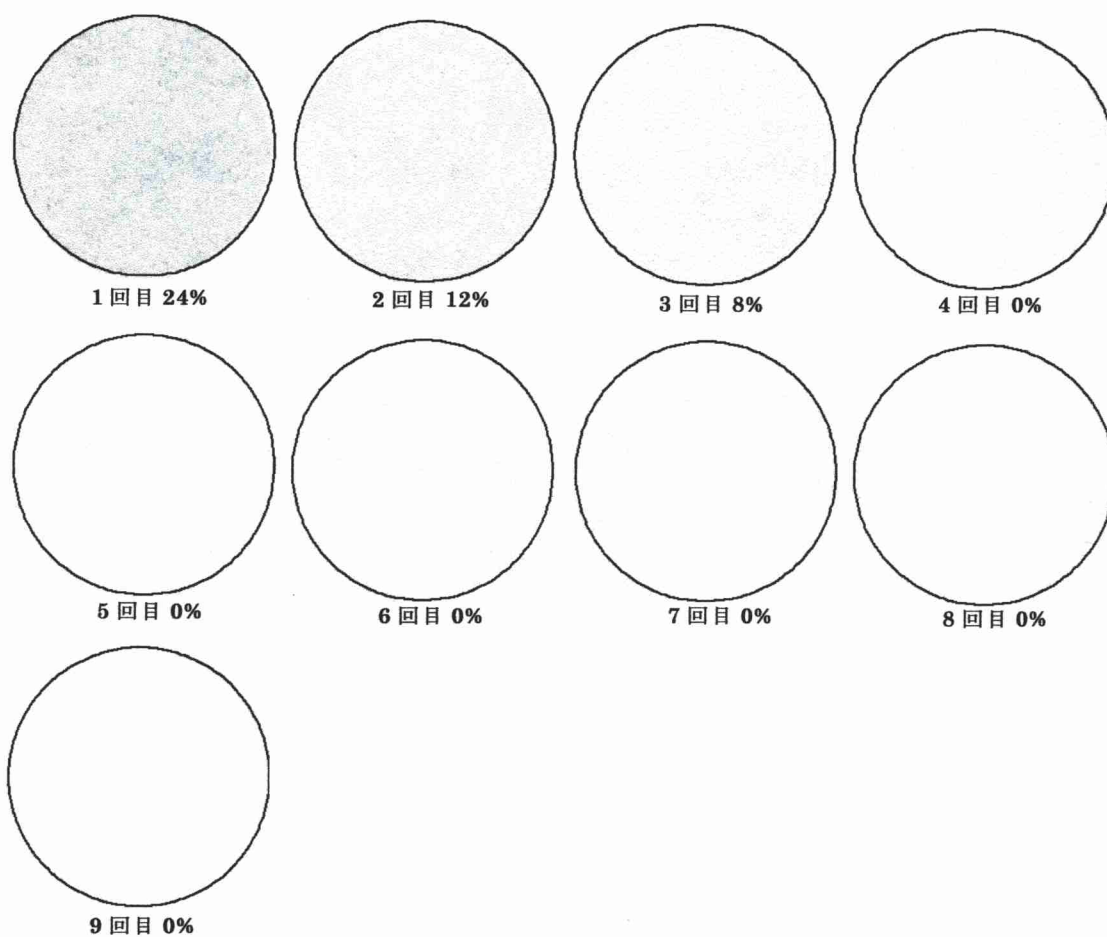


図 6.25 9回目捕集実験時のろ紙汚染度

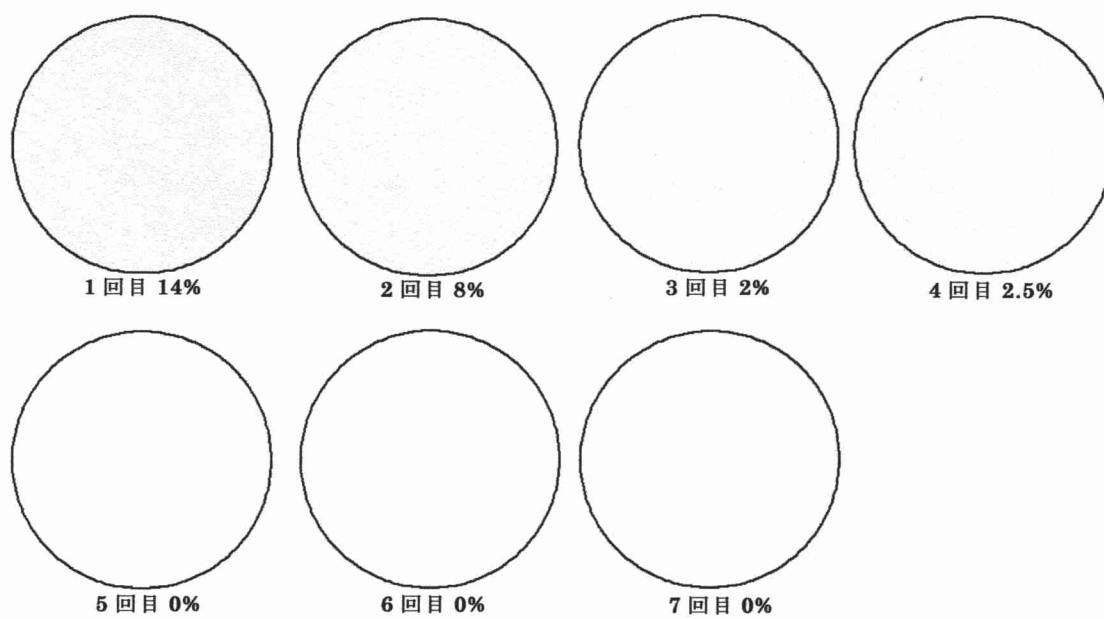


図 6.26 10回目捕集実験時のろ紙汚染度

## 第7章 結言

本論文において船用ディーゼル機関からの排出微粒子低減用フィルタとしてセラミックフィルタおよび金属フィルタを提案し、それぞれの排出微粒子捕集能力と排気ガス圧力に対する耐久性を、小型ディーゼル発電機を使用した捕集実験から検証した。また、誘導加熱によるフィルタの加熱再生実験を行いフィルタの加熱・冷却における耐久性を実験的に検証した。さらに誘導加熱電源として新たな考え方による複合共振回路を提案し、直列共振回路および従来までの複合共振回路との比較を行った。また、インバータの発振回路としてソフトスタートとソフトスイッチングを同時に実現する制御回路を提案し、この発振回路と本論文で提案した複合共振回路を用いた誘導加熱実験から本発振回路および本論文の複合共振回路における理論の正当性を検証した。これらの実験より本研究では、以下に要約する結果を得ることができた。

- (1) セラミック繊維フィルタを使用した円筒状フィルタでは、排出微粒子の捕集実験と加熱再生実験の繰り返しによりセラミック繊維が劣化することが分かった。また、セラミック繊維が非磁性体であるためパンチングメタルからの伝熱によって、セラミック繊維フィルタの加熱再生を行うためフィルタの再生に約 40 分かかり、投入電力量は 1.46kWh 必要となった。したがって、セラミック繊維フィルタを用いる場合は、再生に必要な電力量を低減するパンチングメタルの構造的、材料的検討がさらに必要だと考えられる。
- (2) 金属繊維フィルタを使用した円筒状フィルタでは、金属フィルタを直接加熱できるためフィルタの再生時間が約 1 分間と非常に短い時間で可能となった。また、フィルタの再生に要した投入電力量は 0.081kWh となり、伝熱で加熱再生するセラミック繊維を使用した円筒状フィルタと比べ約 1/18 まで抑制することができた。したがって、排出微粒子低減システムにおいて将来有望なフィルタ構造および材質である。ただし、1 分間という短時間での再生が可能だったのは、ろ材の溶接部が開く前の 1 回目加熱再生実験時のみであった。したがって、今後フィルタの構造(特に溶接部)およびフィルタの加熱再生時における温度制御を再検討する必要がある。
- (3) 本論文で提案する複合共振回路を直列共振回路および従来の複合共振回路と比較した結果、負荷定数および入力電圧、動作周波数一定の条件下で回路パラメータを極端に大きくすることなく、どの回路よりも高出力を出すことができたことが分かった。したがって、本システムの誘導加熱電源として適していると言える。さらに、低電圧源のバッテリーにおいても十分な出力を得ることができ、自動車用にも応用可能であると考えられる。
- (4) 本論文のソフトスタートとソフトスイッチングを同時に実現する発振回路を使用した誘導加熱実験から回路の始動時に問題となっていたハードスイッチングによるサージ電圧をソフトスタートさせることにより抑制し、安定した始動を実現した。さらに、負荷変動が生じた場合にも負荷の変動に対応してスイッチングパルスを制御し、ソフトスイッチングを維持した。これにより常にインバータの安定動作を実現することができた。

## 謝辞

本研究を進め、本論文をまとめるに際して御熱心な御指導、御鞭撻を賜りました東京商船大学商船学部動力システム工学講座の畑中義博教授に感謝の意を表し厚く御礼申し上げます。

また、種々のご検討を頂いたばかりでなく、公私にわたり御苦勞をおかけいたしました東京商船大学商船学部動力システム工学講座の木船弘康助手、東大介技官(現、機械設備講座技官)に深く感謝いたします。

並びに、誘導加熱実験等において御尽力戴いた平成 13 年度卒業研究学生、中川信男氏(現、日本郵船㈱)、森田崇文氏(現、川崎汽船㈱)、平成 14 年度卒業研究学生、山口翼氏、和田朋幸氏、平成 15 年度卒業研究学生、大塚琢也氏および電気動力研究室の皆様には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表しますとともに御礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) 「自動車 NO<sub>x</sub>・PM 法の手引き」,環境省・国土交通省
- (2) JCAP 技術報告書,「ディーゼルエンジンオイル性状が PM に及ぼす影響」,  
(財)石油産業活性化センターJCAP 推進室
- (3) 平田,「船舶起源の大気環境汚染防止と船用機関の将来」,日本マリンエンジニアリング学会誌,Vol.37 No.1 2002
- (4) インターネット,「排気ガスのマメ知識」より
- (5) 鈴木,「ディーゼル微粒子フィルタの技術動向」,日本マリンエンジニアリング学会誌,Vol.36 No.5 2001
- (6) インターネット,「ディーゼルエンジン運転時の黒煙排気対策の調査研究」,株式会社ササクラ
- (7) JCAP 技術報告書,「連続再生式 DPF に及ぼすオイルアッシュの影響調査」,  
(財)石油産業活性化センター JCAP 推進室
- (8) 作田,「金属繊維の焼結不織布ろ材とその応用について」,工業材料平成 12 年 9 月号
- (9) 窪田,「誘導加熱用高周波インバータとそのソフトスイッチングに関する研究」,1999 年度東京商船大学学位論文
- (10) 佐藤、吉田,「高周波誘導加熱による PM 低減 ZCS 高周波インバータの研究」,2000 年度東京商船大学卒業論文
- (11) 佐藤、木船、畑中,「排出微粒子低減高周波誘導加熱システムの研究」,第 50 回東京商船大学学術講演会論文集 pp77-80 (2002)
- (12) 佐藤、木船、畑中,「排出微粒子低減高周波誘導加熱システムの研究」,第 67 回日本マリンエンジニアリング学術講演会論文集 pp57-60 (2002)
- (13) 中川、森田,「排出微粒子低減高周波誘導加熱電源の研究」,2001 年度東京商船大学卒業論文
- (14) 山口、和田,「ディーゼル機関排出微粒子の高周波誘導加熱による低減の研究」,2002 年度東京商船大学卒業論文
- (15) 原田他,「ソフトスイッチング電源技術」,日刊工業新聞社
- (16) 高橋、粉川,「パワーエレクトロニクス」,オーム社
- (17) 赤木、松井、小笠原他,「パワーエレクトロニクス」,日刊工業新聞社
- (18) 西川他,「楽しく学ぶデジタル回路」,オーム社